



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

MARIA POROPUDAS

POLYVINYYLIKLOORIDIN (PVC) KIERRÄTYS JA UUSIOKÄYTTÖ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pentti Järvelä
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja
materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 6. huhtikuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

POROPUDAS, MARIA: Polyvinyylikloridin (PVC) kierrätys ja uusiokäyttö

Diplomityö, 77 sivua, 13 liitesivua

Toukokuu 2011

Pääaine: Muovit ja elastomeerit

Tarkastaja: professori Pentti Järvelä

Avainsanat: Hyödyntäminen, kannattavuus, mekaaninen kierrätys, muovijäte, pehmitetty PVC, prosessointi, uusiomateriaali

PVC-muovi on yksi käytetyimmistä muovityypeistä Suomessa. PVC-muovin monipuolisen käytön seurauksena jätettä syntyy hajanaisesti, ja joitain vuosikymmeniä vanhoja sovelluksia päätyy vasta nyt ensimmäistä kertaa jätteeksi. Samaan aikaan Euroopan Unionissa kiristetään lainsäädäntöä jätteen hyötykäyttötavoitteiden ja -vaatimusten osalta, jolloin vaikutukset tuntuvat myös Suomessa.

Suomen jätelainsäädäntö elää uudistusaikaa. Jätelakia uudistetaan ja uuden lain on tarkoitus astua voimaan vuoden 2011 aikana. Jäteverotuksen veropohjaa laajennettiin vuoden 2011 alusta lähtien koskemaan sekä yksityisiä että yleisiä kaatopaikkoja. Jäteverotaso on nostettu asteittain, ja 1.1.2011 alkaen jätevero on 40 euroa tonnilta kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä.

Tämän työn tavoitteena on tutkia pehmitetyn PVC-muovijätteen hyötykäyttömahdollisuuksia Suomessa. Tarkastelun tavoitteena on ottaa huomioon hyötykäytön tekniset, taloudelliset sekä ympäristöperusteiset tekijät.

Kirjallisuusosassa määritetään pre- ja post- consumer PVC-jättemääriä ja jätteen syntypaikkoja, ja tarkastellaan jätteiden hyödyntämiseen liittyvää lainsäädäntöä. Lisäksi kartoitetaan jätteeksi päätyvien sovellusten tuotekoostumuksia ja selvitetään pehmitetyn PVC:n kemiallisia ja mekaanisia ominaisuuksia. Tämän jälkeen tarkastellaan käytön ja prosessoinnin vaikutuksia muovimateriaalissa. Teoriaosan lopuksi esitellään mekaanisen kierrätyksen keskeiset operaatiot: murskaus- ja erottelumenetelmät.

Varsinaisiin pehmitetyn PVC:n hyödyntämismenetelmiin perehdytään tarkastelemalla neljää eri hyödyntämismahdollisuutta sekä arvioimalla kunkin menetelmän ylläpito- ja investointikustannuksia. Lisäksi kokeellisessa osassa simuloidaan pehmitetyn PVC-muovin materiaalikierätystä. Tutkimuksessa selvitetään kierrätyksen vaikutusta materiaalin prosessoitavuuteen ja karakterisoidaan kierrätysseosten ominaisuuksia.

Pehmitetyn PVC:n kierrättäminen on teknisesti mahdollista, mutta taloudelliset tekijät ja suhteellisen pienet jätevolyymit Suomessa rajoittavat kierrätysliiketoimintaa. Hyvälaatuisen uusiomateriaalin valmistus pehmitetystä PVC:stä varsinaisena liiketoimintana on tuskin kannattavaa, koska nettokustannuksiin vaikuttaa useita epävarmuustekijöitä. Kun klooripitoisen jätteen määrä poltosta saadaan vähennettyä, syntyy savukaasujen puhdistuksesta välillinen kustannussäästö. Mikäli välillinen säästö savukaasunpuhdistuksesta kattaisi kierrätyksestä aiheutuvat kulut, mekaanisen kierrätyksen integroiminen käsittelylaitoksen yhteyteen voisi olla järkevää.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

POROPUDAS, MARIA: Recycling and Reuse of Polyvinyl Chloride (PVC)

Master of Science Thesis, 77 pages, 13 Appendix pages

May 2011

Major: Plastics and Elastomer Technology

Examiner: Professor Pentti Järvelä

Keywords: Flexible PVC, mechanical recycling, plastics waste, processing, profitability, recovered material, utilization

Polyvinylchloride (PVC) is one of the most used plastics in Finland. PVC is used all-round and as a result the PVC waste is produced scrappily. Some long-life applications end up to wasting just now for the first time.

Waste legislation in Finland is being renewed and Waste Act is to take effect during the year 2011. The total reform includes levy which will be extended to concern both private and public dumping grounds. The tax level has increased gradually and since 1st of January 2011 the tax level is 40 euro per tonne delivered to landfill.

The object of this thesis is to research recycling possibilities of flexible PVC waste in Finland taking into account technical, economical and environmental factors. In the literature part amounts of pre- and post- consumer wastes and their places of origin are introduced first. Next, the compositions of flexible applications and properties of flexible PVC are represented. After that the impacts of usage and recycling on plastics are explained. Finally, the most central operations of mechanical recycling processes, crushing and sorting techniques, are reviewed.

Four actual utilizing processes are introduced more in detail. Their production and investment costs are taken into account. The experimental part of this thesis contains a simulation of flexible PVC recycling. The aim of the simulation is to investigate influences of recycling on material's processability and material properties.

The recycling of flexible PVC is technically feasible. In Finland the economical factors and the relatively small waste volumes unfortunately limit the recycling business. Producing simply high quality recyclate from flexible PVC is hardly profitable because of many factors of uncertainty. When the chlorine-bearing waste amount in incineration is reduced, indirect savings follow from the flue gas purification. In case these savings cover the expenses of recycling then connecting a mechanical recycling process to an existing waste treatment plant would be realistic.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorioon syksyn 2010 ja kevään 2011 välisenä aikana. Työn valvojana ja tarkastajana toimi professori Pentti Järvelä, jolle haluaisin esittää suuret kiitokset arvokkaista neuvoista ja asiantuntevasta ohjauksesta niin kandidaatintyössäni kuin diplomityöni aikana.

Työn rahoittajana on toiminut Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiö, jolle haluan esittää kiitokseni mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö. Työ tehtiin yhteistyössä Ekokem Oy:n kanssa, ja erityiset kiitokset kuuluvatkin Ekokem Oy:n tutkuspäällikkö Toni Anderssonille asiantuntevista näkemyksistä sekä kannustavasta ja positiivisesta suhtautumisesta diplomityötäni kohtaan. Suuret kiitokset kuuluvat samoin tutkimusinsinööri Varpu Nurmelle, joka oli jatkuvasti kiinnostunut työn etenemisestä, kommentoi keskeneräisiä opinnäytetöitäni ja antoi tärkeitä vinkkejä yhteistyömme aikana.

Suuret kiitokset kuuluvat tietenkin myös perheelle, sukulaisille ja kavereille, jotka ovat tukeneet minua opintojeni aikana. Erityisen lämpimät kiitokset kuuluvat vanhemmilleni, joilta olen saanut viisaita neuvoja, tukea ja kannustusta opiskeluiden, ja koko elämäni aikana.

Tampereella 5.4.2011

Maria Poropudas

SISÄLLYS

Tiivistelmä	II
Abstract	III
Alkusanat	IV
Termit ja niiden määritelmät	IX
1. Johdanto	1
2. PVC-jätteen nykytila Suomessa	2
2.1. Jättemäärä	2
2.2. Jätevirrat ja jakeet	3
2.2.1. Pre-consumer	3
2.2.2. Post-consumer	4
2.3. Kierrätys ja hyötykäyttö	6
2.3.1. Pre-consumer -jätteen kierrätys	6
2.3.2. Post-consumer -jätteen hyötykäyttö	7
2.4. Lainsäädäntö	7
2.4.1. Jätelaki	8
2.4.2. Jäteverolaki	8
2.4.3. Tavoitteet ja muut säädökset	8
2.5. PVC:n hyödyntämisen nykytila	9
2.5.1. Kierrätysliiketoiminta	10
2.5.2. Käyttökohteita	10
2.5.3. Kierrätyksen kannattavuus	10
2.5.4. PVC:n kierrätyksen haasteet Suomessa	11
3. Pehmitetty PVC	13
3.1. Kemiaallinen koostumus	13
3.1.1. Pehmittimet ja stabilisaattorit	14
3.1.2. Muut lisäaineet	14
3.1.3. Tuotekoostumus	14
3.2. Mekaaniset ominaisuudet	15
3.3. Prosessointimenetelmät ja käyttö	16
3.4. Pehmitetty PVC-jäte	16
3.4.1. Jättemäärä	17
3.4.2. Hyödynnettävissä oleva jäte	18
3.4.3. Suojapeitteet	18
3.4.4. Lattianpäällysteet	19
3.4.5. Erilaiset letkut	20
3.4.6. PVC-hallit	21
3.4.7. Muu jäte	21
4. Pehmitetyn PVC-jätteen hyödyntäminen	22
4.1. Käytön ja prosessoinnin vaikutus muovimateriaaliin	22
4.2. Kierrätysmateriaalin vaikutus prosessointiin	23

4.3.	Mekaaninen kierrätys	23
4.3.1.	Uusiomateriaali	24
4.4.	Esimerkit mekaanisesta kierrätyksestä.....	25
4.4.1.	AgPR.....	26
4.4.2.	Vinyloop®	28
4.4.3.	Texyloop®	29
4.5.	Terminen ja kemiallinen hyödyntäminen.....	29
4.5.1.	MVR Hamburg	30
4.5.2.	Dow/BSL	30
5.	Murskaus- ja erottelumenetelmät	31
5.1.	Murskaus	31
5.2.	Murskain- ja jauhatustyytit	31
5.2.1.	Leukamurskain.....	31
5.2.2.	Iskumurskain.....	32
5.2.3.	Vasaramylly	32
5.2.4.	Repijämyllyt ja veitsimyllyt	32
5.2.5.	Jauhatusmyllyt	33
5.3.	Erottelu	34
5.4.	Tiheyteen perustuva erottelu	34
5.4.1.	Kellumis-uppoamis-erottelu	34
5.4.2.	Hydrosyklonierottelu	35
5.4.3.	Ilmaseulonta.....	35
5.5.	Elektrostaattinen erottelu	36
5.6.	Liukoisuuteen perustuva erottelu	36
5.7.	Lämpöerottelu	37
5.8.	Manuaalinen ja automaattinen erottelu	37
6.	Hyödyntämismahdollisuudet.....	39
6.1.	Jätteen keräys	39
6.2.	Jätteen lajittelu	40
6.3.	Mekaaninen kierrätys (murskaus/jauhatus).....	41
6.3.1.	Syötemateriaali ja kapasiteetti	41
6.3.2.	Prosessi	42
6.3.3.	Lopputuotteet	43
6.3.4.	Muut tekijät.....	44
6.4.	Mekaaninen kierrätys (granulointi).....	44
6.4.1.	Syötemateriaali ja kapasiteetti	45
6.4.2.	Prosessi	45
6.4.3.	Lopputuotteet	46
6.4.4.	Muut tekijät.....	46
6.5.	Integroitu Vinyloop-prosessi.....	46
6.5.1.	Syötemateriaali ja kapasiteetti	47
6.5.2.	Prosessi	47

6.5.3.	Lopputuotteet	48
6.5.4.	Muut tekijät.....	48
6.6.	Raaka-ainekierrätys.....	49
6.6.1.	Syötemateriaali ja kapasiteetti	49
6.6.2.	Prosessi	49
6.6.3.	Lopputuotteet	50
6.6.4.	Muut tekijät.....	50
6.7.	Ympäristövaikutukset	51
7.	Käsittelymenetelmien soveltuvuus.....	52
7.1.	Hyödyntämismenetelmien vertailu	52
7.2.	Lopputuotteiden käyttömahdollisuudet.....	53
7.2.1.	Jauhe ja rouhe	53
7.2.2.	HCl.....	54
7.3.	Menetelmien markkinapotentiaali.....	54
8.	Tutkimusmenetelmät ja aineisto	56
8.1.	Materiaali	56
8.2.	Ekstruusioajot.....	57
8.3.	Rouhinta	58
8.4.	Seosten teko	58
8.5.	Koesauvojen valmistus.....	58
8.6.	Analyysien suoritus ja laitteisto	60
8.6.1.	Kvalitatiivinen koostumusanalyysi.....	60
8.6.2.	Kvantitatiivinen analyysi	60
8.6.3.	Termogravimetrinen analyysi	60
8.6.4.	DMA-analyysi	61
8.6.5.	DSC-analyysi	61
8.6.6.	Shore-kovuuden mittaus	61
8.6.7.	Vetokoe	62
9.	Tulokset ja niiden tarkastelu	63
9.1.	Kvalitatiivinen analyysi	63
9.2.	Kvantitatiivinen analyysi	63
9.3.	Termogravimetrinen analyysi	63
9.4.	DMA-analyysi.....	64
9.5.	DSC-analyysi	65
9.6.	Shore-kovuus	65
9.7.	Vetokoe	66
9.7.1.	Murtolujuus.....	66
9.7.2.	Murtovenymä.....	66
9.8.	Visuaalinen tarkastelu	67
9.9.	Yhteenveto tuloksista	67
10.	Johtopäätökset.....	69
	Lähteet.....	71

Liite 1: Pehmittimet ja stabilaattorit [9]	78
Liite 2: PVC:n ominaisuuksia [29]	79
Liite 3: Jättemäärälaskelma	81
Liite 4: Vinyloop®- ja Taxyloop® -prosessit [44]	82
Liite 5: Menetelmien edut ja haitat	83
Liite 6: Ekstruusion ajoarvot	85
Liite 7: Ruiskuvalujen ajoarvot	86
Liite 8: DMA-analyysitulokset	87
Liite 9: DSC-analyysitulokset	88
Liite 10: Kovuuskokeesta saadut Shore A kovuusarvot	89
Liite 11: Vetokokeesta saadut murtolujuudet ja murtovenymät	90

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

σ	Vetokokeessa saatava murtolujuus
ε	Vetokokeessa saatava myötymä
L_0	Koesauvan mitattava pituus ennen vetoa
ΔL_0	Koesauvan mittapituuden muutos
p- %	Painoprosentti
rpm	Kierrosta minuutissa
Ba/Cd-stabilointi	Barium-kadmium -stabilointi
BBP	Bentsyylibutyyliftalaatti
CaCO₃	Kalsiumkarbonaatti
Ca/Zn-stabilointi	Kalsium-sinkki -stabilointi
Cd	Kadmium
DINP	Di-isonyyliiftalaatti
DIOP	Di-iso-oktyyliiftalaatti
DMA	Dynaamis-mekaaninen analyysi
DOA	Dioktyyliadipaatti
DOP	DEHP, Di-2-(etyyliheksyyli)ftalaatti
DSC	Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria
EU	Euroopan Unioni
Ftalaatti	Ftalaattihapon esterit, pehmitinaine
Granulointi	Kestomuovien rakeistusprosessi
HCl	Vetykloridi, suolahappo
Kestomuovi	Lämpömuokattava polymeeri
NIR	Near Infrared Spectroscopy
PBT	Polybuteenitereftalaatti
PCB	Polykloorattu bifenyylit
PE-LD	Pienitiheksinen polyeteeni
PET	Polyeteenitereftalaatti
phr	”Per hundred of resin” lisäaineosuus sataa osaa raaka-ainetta kohden
Post-consumer	Käytöstä poistunut tuote
PP	Polypropeeni
Pre-consumer	Tuotanto- ja asennusvaiheen jäte
PS	Polystyreeni
PU	Polyuretaani
PVB	Polyvinyylibutyraatti
PVC	Polyvinyylikloridi
PVC-P	Pehmitetty polyvinyylikloridi
PVC-U	Kova PVC
Py-GC-MS	Pyrolyysi-kaasukromatografia-massaspektrometri

R-PVC**T_g****TGA****UV**

Korkealaatuinen kierrätetty PVC

Lasiirtymälämpötila

Termogravimetrisen analyysi

Ultravioletti

1. JOHDANTO

PVC-muovi on yksi laaja-alaisimmin käytetyistä valtamuoveista. PVC-muovi on paljon käytetty sekä rakennusosalalla että kuluttajatuotteissa, jolloin siitä syntyvä jäte on hyvin hajallaan. Polyvinyylikloridin käyttö rakennusmateriaalina yleistyi Suomessa erityisesti 1960- ja 1970 -luvulla. Nyt vuosikymmeniä käytössä olleet sovellukset tulevat käyttöikänsä päähän ja jätemäärän ennustetaan kasvavan. [1, 2]

Jätealan lainsäädäntöä uudistetaan ja ajanmukaistetaan Suomessa vastaamaan jäte- ja ympäristöpolitiikkaa sekä EU-lainsäädännön vaatimuksia. Asteittain nousevan jäteveron tason on ehdotettu nousevan seuraavan kerran vuoden 2013 alusta, jolloin jäteverotasoksi on ehdotettu 50 euroa tonnilta kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä. Jätealan kokonaisuudistus kattaa veropohjan laajentamisen koskemaan sekä yksityisiä että yleisiä kaatopaikkoja. [3]

Työn tavoitteena on selvittää pehmitetyn PVC-muovijätteen hyötykäyttömahdollisuuksia Suomessa. Työ jakautuu kahteen osaan: kirjallisuusosaan ja kokeelliseen osaan. Työn kirjallisuusosassa perehdytään PVC-jätteen nykytilaan Suomessa, pehmitetyn PVC-muovin ominaisuuksiin ja käyttöön, sekä nykyisiin käytössä oleviin hyödyntämismenetelmiin.

Kokeellisessa osassa selvitetään kirjallisuuteen ja laskelmiin perustuen kolmen mekaanisen kierrätysmenetelmän ja yhden raaka-ainekierrätysmenetelmän soveltuvuutta Suomeen. Tämän jälkeen arvioidaan karkeasti menetelmien tuotanto- ja investointikustannuksia. Lopuksi vertaillaan käsittelymenetelmiä keskenään ja esitetään yhteenveto menetelmien soveltuvuudesta.

Lisäksi työn kokeellisessa tutkimusosassa simuloidaan pehmitetyn PVC:n materiaali-kierrätystä. Tarkoituksena on tutkia kierrätyksen vaikutusta prosessoitavuuteen ja karakterisoida kierrätysmateriaaliseosten ominaisuuksia. Vaikka neutraalin muovin kierrätystä ei voi verrata likaisen jätemuovin kierrätykseen, tarkoituksena on havainnoida kierrätys-PVC:n prosessointiin liittyviä mahdollisia ongelmia ja vaikutuksia materiaaliominaisuuksiin.

2. PVC-JÄTTEEN NYKYTILA SUOMESSA

Muovijätettä syntyy Suomessa yhteensä 160 000 tonnia vuodessa. Yhtenäisiä muovijätevirtoja on kohtalaisen vähän ja ne ovat hajallaan. [1] Suomelle tyypillinen haja-asutus, maan laaja pinta-ala ja jätemäärän vähäisyys vaikeuttavat jätteen keräystä ja kierrätystä. Yhtenäistä korkean PVC-pitoisuuden jätevirtaa ei Suomessa ole, vaan käytöstä poistuvat PVC-tuotteet päätyvät pääosin tällä hetkellä muun jätteen seassa kaatopaikalle. [4]

Sekakaatopaikkojen määrä Suomessa on vähentynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana yli 100:sta 40:een [1]. Ympäristötietoisuus, nousseet kaatopaikkamaksut ja raaka-ainehinnat ovat lisänneet yleisesti muovien hyötykäyttöä. Lisäksi tiettyihin tuoteryhmiin asetetut tuottajavelvoitteet lisäävät hyötykäyttöä. Suomessa joissain tapauksissa teollisuus on ottanut vapaaehtoisesti tuottajan vastuun itselleen, kuten muoviputkien kierrätyksessä. [1]

2.1. Jättemäärä

Yleinen muovijättemäärä on kasvussa ja kasvuennuste Suomessa on noin 15 % vuoteen 2030 vuoden 2007 tasosta. Syitä muovijättemäärän kasvuun ovat yleinen kulutuksen lisääntyminen, muovin monikäyttöisyys ja muiden materiaalien korvaaminen muovilla. [5]

Vuonna 2000 Suomessa on arvioitu vuosittain syntyvän 30 000 tonnia PVC-jätettä. [6] Suomessa ainoa sektori, jolla PVC-muovin kulutus on kasvanut, on rakennusala [4]. Rakennusalan sovellukset ovat usein käyttöiältään pitkä- tai hyvin pitkäikäisiä, jolloin jäte syntyy pitkän aikaviiveen jälkeen. 40–50 vuotta vanhoista rakennuksista alkaa vasta nyt syntyä ensimmäisen kerran jätettä, mikä vaikuttaa PVC-jättemäärän kasvuun.

Jättemäärän tarkkaa arviointia vaikeuttavia tekijöitä:

- PVC:n osuus vienti- ja tuontituotteiden määrässä ei ole tiedossa
- Jättemäärät ja -koostumukset ovat aloittain huonosti tiedossa
- Pehmitetyn PVC-tuotteen painosta lisäaineiden osuus on huomattava
- Vaahdotettujen PVC-tuotteiden ominaispaino on huomattavasti kevyempi

[4, 7]

Euroopassa rakennusosalalla erityisesti kovien profiilien käyttö on lisääntynyt voimakkaasti, minkä vuoksi niistä syntyvän jättemäärän on ennustettu kasvavan ainakin vuoteen 2040 asti. Suojakatteista syntyvän jättemäärän ennustetaan kasvavan vuoteen 2020 asti. Putki- ja kaapelijättemäärän uskotaan kasvavan ainakin seuraavan 10 vuoden ajan, ja lattianpäällystejättemäärän tasaantuvan vuoden 2010 jälkeen. [8]

2.2. Jätevirrat ja jakeet

PVC-jätettä syntyy sekä tuotannossa että käytöstä poistuvista tuotteista. Pre-consumer -jätteellä tarkoitetaan tuotannossa ja asennusvaiheessa syntyvää hävikkiä ja post-consumer -jätteellä käytöstä poistuvia likaantuneita tuotteita. [2] Pre-consumer -jäte on puhtaampaa ja se saadaan kerättyä suoraan jätteesyntypaikaltaan ilman pitkää aikaviivettä. Likaantuneen post-consumer -jätteen hyödyntäminen on vähäisempää korkeiden keräys-, lajittelu- ja käsittelykustannusten takia. Vain hyvin pieni määrä (3 %) PVC -post-consumer -jätteestä kierrätetään, ja joitakin jätteitä ei välttämättä koskaan onnistuta kierrättämään, kuten maan alle jääviä vesiputkia. [2]

2.2.1. Pre-consumer

Muovituotannossa syntyy aina hävikkiä, vaikka kestopuoveja voidaan prosessoida tuotannossa uudelleen. Teollisuuslaitoksen mukaan 2...15 % hankitusta muoviraaka-aineesta ei päädy lopputuotteeseen [1]. Tuotantojäte on puhdasta, ja suurin osa siitä kierrätetään omassa tuotannossa, jolloin se ei koskaan päädy ulkoiseen PVC-jätevirtaan. [2] Pre-consumer -jätteen hyödyntämistä auttaa, että jäte päättyy nopeasti jätevirtaan ja sen koostumus on tunnettu. Kun jäte päättyy nopeasti jätevirtaan, muovien ominaisuuksia tyypillisesti heikentävä ominaisuus, vanheneminen, ei ehdi heikentää vastaavalla tavalla polymeerin mekaanisia ominaisuuksia kuin pitkäikäisillä tuotteilla.

Tähän työhön esiselvityksenä tehty haastattelututkimus osoitti, että 12 kansainvälisen eri alojen PVC-muovituotteita valmistavan yrityksen Suomessa tuottama kokonaisjättemäärä on noin 600 t/v. Kokonaisjättemäärä on tuotantolaitoksesta poistuva osuus, eikä sisällä omassa tuotannossa hyödynnettävää jätettä. [9] Jättemääräosuudet ja -jakeet on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Pre-consumer -jäte tuoteryhmittäin haastattelututkimuksen perusteella.

Tuoteryhmä	Kova / Pehmitetty	Osuus kokonaisjättemäärästä (%)
Erilaiset pinnoitetut kankaat	P	28
Lattianpäällysteet	P	10
Erilaiset letkut	P	9
Raaka-ainejäte	P	8
Erilaiset pinnoitetut kalvot	P	3
Kaapelit	P	0
Pehmitetty yhteensä		57
Erilaiset kovat putket	K	27
Erilaiset kovat profiilit	K	8
Raaka-ainejäte	K	8
Kova yhteensä		43
Kokonaisjättemäärä	P&K	100

Haastattelututkimuksen keskeiset havainnot pre-consumer -jätteestä olivat:

- Kokonaisjättemäärästä pehmitettyä jätettä on noin 57 p- % ja kovaa 43 p- %.
- Eniten jätettä Suomessa syntyy erilaisista pinnoitetuista kankaista, kovista putkista ja -profiileista sekä lattianpäällysteistä, joiden osuus on 65 % kokonaisjättemäärästä. (Toisaalta tähän tulokseen vaikuttavat suuret tuotantovolyymit.)
- Jättemäärä ei riipu tuotantokapasiteetista.
- Kaikki valmistajat eivät tienneet tarkkoja PVC-jättemääriään.
- Annettujen tietojen perusteella tuotannon keskimääräinen hävikki oli 2.5 %.

Mikäli pienten- ja keski suurten yritysten yhteisjättemäärän arvioitaisiin olevan haastattelutuloksen lisäksi 600 t/v, pre-consumer -kokonaisjättemäärä Suomessa olisi 1200 t/v. Toisen lähdetiedon mukaan pre-consumer -jätettä syntyy Suomessa 200...2000 t/v. [6] Mikäli pre-consumer -jäteosuus olisi 12 % kokonaisjättemäärästä [2], jätettä syntyisi 3600 t/v. Todennäköinen vaihteluväli pre-consumer -jätteelle Suomessa on 1000...3000 t/v. [9]

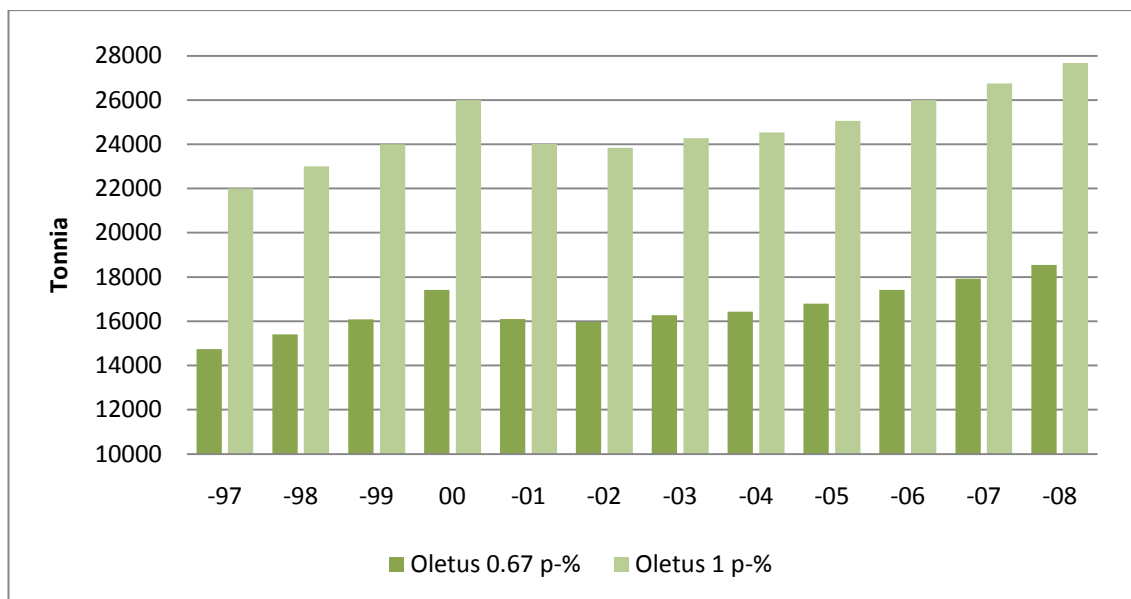
2.2.2. Post-consumer

Post-consumer -jätettä ovat käytöstä poistuvat sovellukset. Post-consumer -jätettä syntyy karkeasti kuudelta sektorilta. Jätejakeet ovat rakennusjäte, pakkausjäte, kotitalous- ja kaupanalan jäte, sähkö- ja elektroniikkaromu, autoromu sekä muut tuotteet. [2] Taulukossa 2.2. nähdään jättemäärän jakautuminen sektoreittain, kun jättemääräksi on oletettu 28 000 t/v. [6]

Taulukko 2.2. *Post-consumer -jätteet syntysektoreittain, Suomessa 2000. [2, 6]*

Jätejake	Osuus (%)	Jäte (t/v)
Rakennusjäte	31,60 %	8848
Pakkausjäte, kotitaloudet ja kaupan alan jäte	42,90 %	12012
Sähkö- ja elektroniikkaromu	9,00 %	2520
Autoromu	14,80 %	4144
Muut tuotteet	1,70 %	476
Yhteensä	100 %	28000

Yhdyskuntajätteeseen kuuluvat kaupan- ja kotitalouksien sekalaiset jätteet sekä pakkausjäte. PVC -muovin osuus yhdyskuntajätteessä on karkeasti arvioituna noin 1 p- % [9]. Tarkempi arvio on 0,60–0,74 p- %, jossa oletetaan, että yhdyskuntajätteen kloorista 50 % on peräisin PVC -muovista. [2] Vaihteluvälin keskiarvoon, 0,67 p- %, perustuva jättemäärä vuosien 1997–2008 ajalta Suomessa olisi 14 700...18 500 t/v. Mikäli osuudeksi oletetaan 1 p- %, jättemäärä on selkeästi suurempi, 22 000...27 700 t/v. Kuvassa 2.1. nähdään PVC:n osuus yhdyskuntajätteessä vuosina 1997–2008.



Kuva 2.1. PVC-muovin osuus yhdyskuntajätteessä.[2, 4, 10]

Kaapelijäte hyödynnetään erottelemalla metalli ja muovi toisistaan, mutta tällöin PVC-muovi on edelleen rouheena muiden muovilaatujen seassa. Tyypillinen kaapelirouhejäte sisältää 60 p- % PVC:tä, ja loput muita muoveja sekä metallia. Kaapelinkuorirouheesta syntyvä kokonaisjättemäärä on arviolta 1000 tonnia vuosittain, jolloin PVC-muovin osuus on noin 600 t/v. [11]

Rakennusjätteen osuus post-consumer -jätteestä Euroopassa vuonna 2000 on 31.6 % ja ennuste vuodelle 2020 on 37.4 % [2]. Rakennusjätteessä oleva PVC-jättemäärä Suomessa vuonna 2000 olisi noin 8800 t/v. PVC:n pitoisuutta rakennusjätteestä on kuitenkin hyvin vaikea määrittää, koska PVC:n paino-osuus tuotteessa riippuu sovelluksesta. Rakennuksilla PVC-muovijäte kerätään asennus- ja purkuvaiheessa sekajätelavoille, jolloin jätesisältö on hyvin epämääräinen. Sekajätelavoilta PVC-muovijäte päättyy tällä hetkellä pääosin kaatopaikalle. [4, 6]

Rakennuksilta PVC-muovia päättyy myös yhdyskuntajätevirtaan. [2] Jäte koostuu asennuksen ylijäämistä, kuljetuksessa rikkoutuneista putkista ja muista tuotteista sekä purku- ja muutostöistä syntyvästä sekajätteestä. [12]

Auton kierrätyksessä murskauksessa erotellaan kevytjäte ja metalli. Muovia, kumia ja tekstiilejä sisältävä kevytjäte sisältää muovista peräisin olevaa klooria 1,5...3 %, jolloin PVC:n osuus olisi 2.6...5.3 % kevytjakeesta. Suomessa kierrätetään virallisen järjestelmän kautta vuosittain 40 000 autoa, mutta kokonaisromutusmäärä on arviolta 100 000 ajoneuvoa vuodessa. [13] Virallisesti kierrätetyistä ajoneuvoista syntyvä PVC-muovijätteen määrä olisi edellisen perusteella vuosittain 1000–2000 t/v.

Taulukko 2.3. Arvio post-consumer -jättemäärästä Suomessa. [2, 9]

Jätejäte	Minimi (t)	Maksimi (t)
Yhdyskuntajäte (0.67 p- %, 1997–08)	14700	18500
Rakennusjäte (31.6 p- %)	8300	9300
Autoromu (40 000 autoa)	1000	2000
Kaapelijäte (600 +/- 200)	400	800
Yhteensä	24400	30600

Eri skenaarioiden perusteella post-consumer -jätteen todennäköiseksi vaihteluväliksi on saatu 25 000...30 000 t/v. [9] Taulukossa 2.3. on esitetty yhteenlaskettu post-consumer -jättemäärä, kun PVC:n osuus yhdyskuntajätteessä on 0,67 p- %.

2.3. Kierrätys ja hyötykäyttö

Muoveja voidaan kierrättää tuotteena, mekaanisesti, kemiallisesti ja termisesti. PVC-muovia hyödynnetään Suomessa energiahyötykäyttöön ja kierrättämällä mekaanisesti. [14] Kemiallista kierrätystä ei tällä hetkellä ole käytössä. [4]

Pieni määrä PVC-muovia yhdyskuntajätteen joukossa ei estä polttoa rinnakkaispoltoissa energiaksi. Energiahyödyntäminen painottuu korkean klooripitoisuuden jätteille soveltuviin jätevoimaloihin. Materiaalikierrätyksessä muovijäte kerätään ja lajitellaan, murskataan, pestään ja suodatetaan epäpuhtaudet pois. Lopuksi materiaali lisäaineistetaan, mahdollisesti värjätään ja granuloidaan. Haasteen mekaaniseen kierrätykseen tuovat puhtausvaatimukset, sillä materiaalien erottelu ja puhdistaminen nostavat käsittelykustannuksia epäpuhtaista jätevirroista ja epähomogeenisista jäte-eristä. Kemiallisessa kierrätyksessä polymeeriketjut pilkotaan takaisin peruskemikaaleiksi. Kemiallisia kierrätysmenetelmiä ovat pyrolyysi, hydrogenointi, kaasutus ja kemolyysi. [14]

Muovien kierrätys onnistuu sitä paremmin, mitä tarkemmin muovijäte on lajiteltu ja mitä puhtaampaa muovi on. Usein jäte sisältää useita eri muovityyppejä, muuta jätettä tai romua. Lisäksi muovituote voi sisältää epäpuhtauksia, metallia, liimaa, lujitteita tai muita muoveja. [1]

Isokokoiset jätteet, joita saadaan kerättyä paljon kerralla syntypaikaltaan, ovat parhaiten kierrätettävissä. Yleisesti muovien alhainen tiheys on positiivinen ominaisuus keräyksen ja kuljetuksen kannalta. [15] Muovien kierrätyksen kannattavuus on sidoksissa neitseellisen raaka-aineen hintaan. Kierrätysmuovin hinta on yleensä 50–80 % neitseellisen muovin hinnasta. [14] PVC:n kilohinta on ollut alhaisin valtamuoveista koko 2000-luvun, mutta tilavuushinnaltaan se on kallein suuren tiheydensä vuoksi. [1]

2.3.1. Pre-consumer -jätteen kierrätys

PVC-valmistajille tehdyn pre-consumer -jätteselvityksen mukaan tuotanto- ja asennusvaiheen jäte kuuluu vapaiden markkinoiden piiriin eli valmistajat hyödyntävät tuottamansa jätteen parhaaksi katsomallaan tavalla. Kaatopaikkaus on usein

valmistajalle edullisempi vaihtoehto kierrätyksen sijaan. [6] Tuotantolaitoksesta jäte toimitetaan joko kaatopaikalle ja maksetaan kaatopaikkauskustannukset tai jäte kierrätetään materiaalina omassa tuotannossa tai ulkoisesti.

Kierrätys ulkoisen tahon avulla tarkoittaa, että kierrättävä yritys noutaa PVC-muovijätteen joko ilmaiseksi tai maksaa korvauksen noudettavasta erästä, joka jälleenmyydään tai käsitellään uudelleen käytettäväksi. Hinta riippuu puhtaudesta ja laadusta. Kierrätys ulkoisen tahon kanssa on sopimuskohtaista. Toimitukseen liittyen sovitaan muovijätteen koostumus, määrä, puhtaus, hinta ja toimitusaika. Ulkoista kierrätystä jätteenkäsittelyssä hyödynsi yli puolet haastatelluista yrityksistä. [11]

Sisäinen kierrätys eli tuotannossa syntyvän PVC-jätteen hyödyntäminen omassa tuotannossa oli hyvin valmistajakohtaista. Hyödyntämisaste vaihteli 0...100 %, mutta kuitenkin niin, että yli puolella valmistajista hyödyntämisaste omaan käyttöön oli yli 90 %. Hyödyntäminen oli tehokasta etenkin ekstruusioprofiilien valmistuksessa tai jos hävikki oli mahdollista rouhia uudelleenkäyttöön. [11]

Muoviputkia, joista osa on PVC-putkia, kerätään Suomessa 11 paikkakunnalta asennusvaiheessa Keravalle jälleenkäsitteltäväksi. Jäte lajitellaan manuaalisesti ja rouhitaan murskeeksi. Jäte koostuu vesijohto-, viemäri-, rumpu-, salaoja- ja lämpöputkista, jotka eivät saisi sisältää metalleja, betonia, irtomaata eikä muuta ilmeistä epäpuhtautta. Vinyl2010 -projekti rahoittaa osin tätä kierrätystoimintaa, jossa käsillään noin 40 tonnia putkijätettä vuodessa. [4, 16]

2.3.2. Post-consumer -jätteen hyötykäyttö

Post-consumer -jäte päätyy lähes sata prosenttisesti kaatopaikoille [4]. Parhaiten hyödynnetään muutamasta eri muovilaadusta koostuva kaapelijäte, joka kierrätetään rouheeksi ratsastuskentille, eikä varsinaista PVC-muovijätettä päädy kaatopaikalle lainkaan. Autokierrätyksestä syntyvä kevytjäte hyödynnetään yhä enemmän energiaksi. Suojapeitteet voidaan myydä uudelleen käyttöön, mikäli ne ovat ehjiä käytön jälkeen. [11] Rakennusten PVC-jätteen hyödyntämisasteesta Suomessa ei ollut saatavilla tietoa [4].

Yhdyskuntajätteen kierrätyksen ongelmana on, että kierrätysmateriaalina se on puhtaudeltaan ja koostumukseltaan hyvin vaihtelevaa. Lisäksi yhdyskuntajätteen keräys, varastointi ja kuljetus tuovat oman haasteensa kierrätykseen. Yhdyskuntajätteen yhteydessä syntyvälle muovivirrälle ei ole toimivaa keräysjärjestelmää muovina [15], vaan muovijäte päätyy kaatopaikkojen ohella yhä enemmän joko energiakäyttöön jätevoimaloissa tai rinnakkaispolttolaitoksissa. [17]

2.4. Lainsäädäntö

Euroopan Unionin jätestrategiassa on laadittu jätehierarkia jätehuollon tavoitteiden tärkeysjärjestyksen määrittelemiseksi. Samat keskeiset periaatteet tiivistyvät Suomen jätehuollossa. Jätehierarkian mukaan ensisijaisesti on pyrittävä estämään jätteen synty. Jos jätteen syntyä ei pystytä välttämään, tulisi jäte hyödyntää ensisijaisesti materiaalina

ja toissijaisesti energiana. Viimeisenä jätehierarkiassa on jätteen turvallinen loppusijoitus kaatopaikalle. [18]

2.4.1. Jätelaki

Suomen jätelaki (1072/1993) tuli voimaan 1.1.1994, jonka jälkeen siihen on tehty useita muutoksia. Lain tavoitteena on tukea kestävästä kehityksestä edistämällä luonnonvarojen järkevää käyttöä sekä ehkäisemällä että torjumalla jätteistä aiheutuvaa vaaraa ja haittaa terveydelle ja ympäristölle. Lainsäädäntöä uudistetaan parhaillaan ja tavoitteena on saada uudistunut laki voimaan vuonna 2011. [19]

Lain mukaan jätteen synty tulisi minimoida, mutta jos jätettä syntyy, on se hyödynnettävä, jos se on teknisesti mahdollista ja siitä ei aiheudu kohtuuttomia lisäkustannuksia verrattuna muulla tavoin järjestettyyn jätehuoltoon.

Tuottajavastuun tavoitteita on tehostaa jätteen synnyn ehkäisemistä ja tuotteiden uudelleenkäyttöä, tehostaa jätteenä käytöstä poistettavan tuotteen tai sen osan uudelleenkäytön, hyödyntämisen ja muun jätehuollon järjestämistä sekä vähentää kaatopaikoille sijoitettavan jätteen määrää ja haitallisuutta sekä jätteistä aiheutuvaa vaaraa tai haittaa ihmisen terveydelle tai ympäristölle. [19]

2.4.2. Jäteverolaki

Uusi jäteverolaki (1126/2010) astui voimaan 1.1.2011. Lain mukaan kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä suoritetaan valtiolle veroa. Jäteveron määrä vuosina oli vuonna 2004 kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä 23 euroa tonnilta jätettä ja vuodesta 2005 alkaen 30 euroa tonnilta jätettä. [3]

Jäteverolakiin ehdotettu muutos (HE 159/2010) veropohjan laajentamisesta hyväksyttiin. Jätevero muutettiin koskemaan niitä kaatopaikalle toimitettavia jätteitä, joiden hyötykäyttö on teknisesti ja ympäristöperusteisesti mahdollista. Jäteveron piiriin kuuluvat sekä yleiset että yksityiset kaatopaikat. Ehdotus verotason nostamisesta 40 euroon tonnilta kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä hyväksyttiin vuoden 2010 lopussa, ja uusi laki astui voimaan 1.1.2011. Jäteverotasoksi vuoden 2013 alusta alkaen on ehdotettu 50 euroa. [3]

2.4.3. Tavoitteet ja muut säädökset

Valtakunnallinen jätesuunnitelma sisältää Suomen jätehuollon päämäärät ja tavoitteet vuoteen 2016 sekä keskeiset toimet niiden saavuttamiseksi. Jätesuunnitelman tavoitteena on yhdyskuntajätteiden osalta kierrättää eli hyödyntää materiaalina 50 %, polttaa eli hyödyntää energiana 30 % ja sijoittaa kaatopaikalle enintään 20 % jätteestä. [20]

Pakkauksia ja pakkausjätettä koskeva laki (962/1997) edellyttää, että pakkaajan on huolehdittava markkinoille saattamiensa pakkausten osalta siitä, että muovipakkausten jätteistä kierrätetään vähintään 22,5 % pakkausjätteen painosta vuoden 2008 loppuun mennessä. [21]

Euroopan parlamentin ja neuvoston asettaman direktiivin (2000/53/EY) mukaan 1. päivään tammikuuta 2015 mennessä romuajoneuvoista käytetään uudelleen tai hyödynnetään vuodessa yhteensä vähintään 95 % sekä käytetään uudelleen tai kierrätetään vuodessa yhteensä vähintään 85 %. [22]

Euroopan unionin REACH -kemikaaliasetus asettaa kiellot sekä kadmiumin käytölle stabilisointiaineena että rajaa ftalaattipohjaisten pehmitinaineiden konsentraatioksi 0,1 painoprosenttia pehmitetyn materiaalin massasta leluissa ja lastenhoitotarvikkeissa. [23]

2.5. PVC:n hyödyntämisen nykytila

Suomessa kierrätetään muovia vuosittain noin 30 000 tonnia. [1] Energiahyötykäyttöön menevä erilliskerätyn muovijätteen määrä on 20 000...30 000 t/v. [17] Rinnakkaispoltossa pieni määrä PVC:tä epäpuhtautena muun materiaalin joukossa ei estä energiahyödyntämistä. Savukaasut käsitellään ja lämpöenergia otetaan talteen. Vaikka poltto energiaksi on erittäin hyvä viimeinen käyttötapa muoville [15], PVC-muovin polttoa rajoittaa kloorin vapautuminen polton yhteydessä.

Muovijätettä hyödynnetään energiaksi Suomessa tällä hetkellä kolmessa arinapolttotekniikkaa käyttävässä jätevoimalassa, joiden yhteiskapasiteetti on 300 000 tonnia. [24] Arinapolttoon ohjautuu muovia sekajätteen mukana sekä likaisten, hyödyntämiskelvottomien jakeiden mukana. Puhtaat, hyödynnettävissä olevat muovijätevirrat on pyritty ensisijaisesti keräämään materiaalkierrätykseen [1] tai kierrätyspolttoaineen valmistukseen. PVC ei sovellu kierrätyspolttoaineen valmistukseen suuren klooripitoisuutensa takia. Selkeä trendi hyödyntämisessä on, että muovijätettä hyödynnetään yhä enemmän energiana rinnakkaispoltossa ja jätevoimaloissa. [17]

Materiaalkierrätyksen kannattavuuteen vaikuttaa muovin hinnan vaihtelu, mikä puolestaan seuraa öljyn hintaa. Lisäksi kierrätyksen kannattavuus riippuu siitä, kuinka paljon uusiomateriaalia pystytään myymään neitseellisen raaka-aineen seassa markkinoilla. Mekaanisessa kierrätyksessä on otettava huomioon erityisesti pitkäikäisissä tuotteissa käytetyt lisäaineet, jotka saattavat tuoda ongelmia kierrätykseen, sekä muovimateriaalin mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen ajansaatossa. Vaikka pyrkimyksenä on hyödyntää jäte ensisijaisesti materiaalina, materiaalkierrätyksen kannattavuus riippuu usean osatekijän summasta. [6]

Tuotannon jäte hyödynnetään tehokkaasti joko omassa tuotannossa tai ulkoisen kierrättäjän toimesta. Isoilla yrityksillä on käytössään kehittyneet kierrätysjärjestelmät, jolloin materiaalin hyödyntämisaste on erittäin korkea, eikä jätettä päädy parhaimmassa tapauksessa lainkaan ulkoiseen jätevirtaan. Mikäli tuotannon jäte toimitetaan uusiomuoviyritykselle, se käytetään joko omaan tuotteeseen tai välitetään kolmannelle yritykselle joko kotimaahan tai ulkomaille. [1, 11]

Euroopan PVC-teollisuus järjesti 10 vuotta kestäneen vapaaehtoisprojektin Vinyl2010, jossa perehdyttiin PVC:n ympäristömyönteisyyteen PVC-tuottajien sekä tuote- ja lisäainevalmistajien voimin. [25] Ohjelmasta seurasi uusi Recovinyl -projekti,

joka pyrkii takaamaan post-consumer -jätevirran saatavuuden kierrätyksen edistämiseksi Euroopassa ja tukemaan kierrätysyrityksiä rahoituksella. [26] Suomalaisia yrityksiä ei ole vielä saatu mukaan post-consumer -jätteen kierrätykseen. [4]

2.5.1. Kierrätysliiketoiminta

Suomessa toimii tällä hetkellä kymmenkunta uusiomuoviyritystä [1], joista ainoastaan yksi yritys sallii pienen pitoisuuden PVC:tä omien uusiotuotteidensa valmistuksessa. Valmistettavassa uusiotuotteessa voi olla PVC:tä noin 2 p- % epäpuhtautena, mutta varsinaista uusiomuovituotetta kierrätys-PVC:lle ei ole olemassa. Lisäksi Suomessa toimii ainakin yksi yritys, joka ohjaa asiakkaitaan PVC-muovivirtojen eteenpäin toimituksessa, mutta yritys ei varsinaisesti itse käsittele PVC:tä. [4, 11]

Mitä puhtaampaa ja lajitellumpaa jäte on, sitä enemmän siitä ollaan valmiita maksamaan. Kierrätyskäsittelyyn toimitettava muovi ei saisi sisältää epäpuhtauksia eikä etenäkään metallia. Kosteudella ei ole PVC:n tapauksessa suurta merkitystä, koska PVC ei ime helposti kosteutta itseensä. Suomessa kierrätetään materiaalina PVC-jätettä arviolta alle 100 tonnia vuodessa ja ulkomaille toimitetaan kierrätettäväksi materiaalina noin 100...200 t/v. [4]

2.5.2. Käyttökohteita

Kierrätettyä materiaalia voidaan hyödyntää joko käyttämällä sitä 100 prosenttisesti tai sekoittamalla neitseellisen materiaalin sekaan kierrätettyä materiaalia vaihtelevia pitoisuuksia. Kierrätys-PVC:n käyttökohteita on koottu taulukkoon 2.4.

Taulukko 2.4. PVC-uusiomuovituotteita.

Autojen lattiamatot	Kengänpohjat	Erilaiset profiilit	Tiilet
Autojen lokasuojat	Lattialaatat	Putket	Kaapelikourut
Meluaidat	Liikennetolpat	Erilaiset matot	Rouhe raviradoille

Tuotannossa käyttökohteen keksiminen saattaa ratkaista jäteongelman. Esimerkkejä käyttökohteista ovat kolmikerrospuutket tai jätteen murskaaminen ratsastus- tai urheilukenttien pohjamateriaaliksi. [4, 6, 11]

2.5.3. Kierrätyksen kannattavuus

Edellytyksenä prosessimaiseen hyötykäyttöön on, että kierrätysmateriaalivirta on tarpeeksi suuri. Pre-consumer -jätteen mekaaninen kierrätyspotentiaali on parempi kuin post-consumer -jätteen, mutta jätemäärä huomattavasti pienempi. Post-consumer -jätekoostumus on heterogeenistä, tuotteiden lisäaineet eivät ole tiedossa ja pitkät käyttöiät vaikeuttavat jätemäärän arviointia. Kierrätyspotentiaali on sitä heikompi, mitä likaisempaa jäte on, eikä mekaaninen kierrätys ole välttämättä aina sopiva vaihtoehto. [6, 11]

Kemiallisessa kierrätyksessä polymeeriketjut pilkotaan takaisin peruskemikaaleiksi. Vaikka monomeereiksi palautettavista polymeeriketjuista saatava uusiomateriaali on puhdasta, kierrätysmenetelmien kustannukset ovat huomattavan korkeat. [6, 14]

Koska kaatopaikalle toimitus on Suomessa yhä suhteellisen edullinen vaihtoehto, materiaalikierrätys ei houkuttele niin kauan, kun se on taloudellisesti kannattamatonta. Vaikka mekaanisen kierrätyksen menetelmät ovat jo olemassa, lajittelukustannukset ovat valitettavan kalliit. Lisäksi PVC:n alhaiseen materiaalikierrätysasteeseen vaikuttavat muiden muovilaatujen ”helpompi” kierrätettävyyys ja uusiomateriaalin käyttökohteen puuttuminen. Suuret, helposti kerättävissä olevat homogeeniset muovijätevirrat (kuten isokokoiset maatalouskalvot, pantilliset PET-pullot, kovat PVC-putket) on jo kerätty kierrätyksen piiriin. [1, 4]

Kaatopaikkasijoitus maksaa Suomessa noin 70...100 € tonnilta, minkä lisäksi jätteentuottaja maksaa kuljetuskustannukset. Kierrätyksen nettokustannukset koostuvat keräyksestä, kuljetuksesta, lajittelusta ja käsittelystä. Lisää kustannuksia kierrättävälle yritykselle syntyy säkkikuluista, varastoinnista, laite- ja ylläpitokustannuksista sekä työvoimakustannuksista. Kierrätyksen kannattavuus on edellä mainittujen tekijöiden jälkeenkin sidoksissa neitseellisen raaka-aineen hintaan ja tuotetun uusiomateriaalin teknisiin ominaisuuksiin. [6, 11]

2.5.4. PVC:n kierrätyksen haasteet Suomessa

Keski-Euroopassa kierrätysaste on huomattavasti korkeampi ja kierrätyslaitokset olleet toiminnassa jo pitkään. Tanskassa puolestaan hyvin korkeiden kaatopaikkamaksujen lisäksi lainsäädäntö ja ympäristöstrategia ovat edistäneet kierrätystä. Suomea ei kuitenkaan voi verrata keskieuroppalaisiin suuriin kierrättäjämaihin, koska PVC-jättemäärä on suhteellisen pieni. [6]

PVC-muovin kierrätyksen haastavuutta lisää se, että suurin osa tuotteista on pitkäikäisiä, eikä kierrätykseen ole kiinnitetty huomiota vastaavalla tavalla aikaisemmin. Erityisesti post-consumer -jätteen kierrättämiseen tarvittaisiin toimiva keräys- ja kierrätysjärjestelmä. Post-consumer -jätteestä Suomessa hyödynnetään tällä hetkellä parhaiten kaapelit ja autoromu, mutta etenkin rakennuksilta syntyvä PVC-jäte tulisi saada lajiteltua jo syntypaikallaan kierrätystä varten. PVC-muovin kierrättämisen haasteita Suomessa ovat:

- PVC-muovin tunnistaminen, lajittelu ja erottelu muusta jätteestä
- Keräys- tai kierrätysjärjestelmää ei ole olemassa
- Jätevirran tulee olla tarpeeksi suuri ja pitkäaikainen
- Suuret kuljetus- ja käsittelykustannukset
- Materiaaliominaisuuksien heikkeneminen kierrätyskertojen myötä
- Yhdistelmämaterialit ja vaahdot vaikeasti kierrätettäviä
- Kehittymättömät uusiomuovimarkkinat [1, 4, 15]

Energiahyödyntämisen trendi Suomessa saattaa vaikuttaa mielenkiintoon materiaalikierrätystä kohtaan. Toisaalta kohtalaisen alhaiset kaatopaikkamaksut eivät myöskään houkuttele kierrättämään. Jätehierarkian mukaan materiaalina hyödyntäminen on kuitenkin ensisijainen vaihtoehto. Tämän vuoksi materiaalikierrätykseen tulisi saada mukaan tukirahoitusjärjestelmä tai alueellisia yhteistyöverkostoja jätevirran takaamiseksi ja keräyksen mahdollistamiseksi. Lisäksi lainsäädännöllä voitaisiin tukea materiaalikierrätyksen lisäämistä Suomessa.

3. PEHMITETTY PVC

PVC-muovituotteet jaetaan koviin ja pehmitettyihin. Pehmitetty PVC sisältää runsaasti pehmitinaineita, joilla saadaan lisättyä materiaalin elastisia ominaisuuksia. Pehmitetty PVC on sitkeää, se kestää hyvin siihen kohdistuvia iskuja ja taipuu erinomaisesti. Kova PVC kestää paremmin siihen kohdistuvaa vetojännitystä, mutta murtuu sekä iskun että taivutuksen vaikutuksesta helpommin. [27]

Vuonna 2000 Suomessa lisäaineettoman PVC -raaka-aineen kokonaiskulutus oli 52 000 tonnia, josta noin 41 % kului pehmitettyihin sovelluksiin. Kulutuksen perusteella keskeisimpiä käyttökohteita ovat kaapelit, kalvot, lattianpäällysteet, letkut ja profiilit sekä pinnoitteet. Lisäksi pehmitettyä PVC:tä on mukana pieniä määriä myös teknisissä tuotteissa ja tuontituotteissa. Kulutus käyttökohteittain on esitetty taulukossa 3.1. [25]

Taulukko 3.1. Pehmitetyn PVC:n kulutus Suomessa vuonna 2000. [25]

Tuote	Osuus (%)	Kulutus (t)
Kalvot	11	5720
Kaapelit	11	5720
Lattianpäällysteet	9	4680
Lekut ja profiilit	6	3120
Pinnoitteet	4	2080
Yhteensä	41	21320

PVC:n hinta on ollut kasvussa muiden muovilaatujen tapaan 2000-luvun alkupuolelta lähtien. Hinta on kivunnut 0,60 €/kg:sta lähes kaksinkertaiseksi. [1] Pehmitetty kalvomuovi maksoi vuoden 2010 heinäkuussa 1.13–1.17 €/kg. [28] PVC:tä tuotetaan maailmalla tällä hetkellä runsaasti, mikä vaikuttaa hintaan ja kilpailukykyyn. [4]

3.1. Kemiaallinen koostumus

Pehmitetyt PVC-tuotteet sisältävät vaihtelevan määrän lisäaineita sovelluksesta riippuen. Lisäaine ja sen pitoisuus seoksessa säätelevät tuotteen ominaisuuksia. PVC:n kohdalla lisäaineista erityistä huomiota ovat herättäneet lyijy- ja kadmiumstabilisaattorit sekä pehmitinaineina käytettävät ftalaatit. [9]

Haitalliseksi todettujen lisäaineiden käyttöä on rajoitettu EU:ssa etenkin 2000-luvulta lähtien. Jo käytössä olevat tuotteet sisältävät edelleen ympäristölle ja terveydelle haitallisia ftalaatteja sekä stabilisaattoreita, mikä tulee ottaa huomioon kierrätyksessä. Käytetyistä pehmitinaineista ja stabilisaattoreista koottu taulukko on esitetty liitteessä 1.

3.1.1. Pehmittimet ja stabilisaattorit

Pehmittimet lisäävät polymeeriin elastisuutta. Pehmitinaineet laskevat viskositeettia ja prosessointilämpötilaa, lisäävät ketjujen liikkuvuutta sekä parantavat yhteensopivuutta muiden lisäaineiden ja polymeerien kanssa. Niiden osuus tuotteessa vaihtelee 15...60 % riippuen sovelluksesta. [29] Käytössä olevia pehmitinaineita ovat ftalaatit, fosfaatit, adipiini- ja atselaiiniesterit, epoksoitu soijaöljy ja klooriparafiinit. [30]

Stabilaattorit eli vanhenemisen estoaineet estävät polymeerien hajoamista korkeassa lämpötilassa prosessoidessa sekä auttavat valmista tuotetta kestämään lämmön, UV-säteilyn, hapen ja otsonin haitallista vaikutusta muoviin. Stabilaattorin osuus on 0.05-5 p- %. Eri vuosikymmenten aikana käytettyjä stabilaattoreita ovat lyijy-, Ba/Cd-, Ba/Zn-, Ca/Zn- ja organotinayhdisteet. [31, 32]

3.1.2. Muut lisäaineet

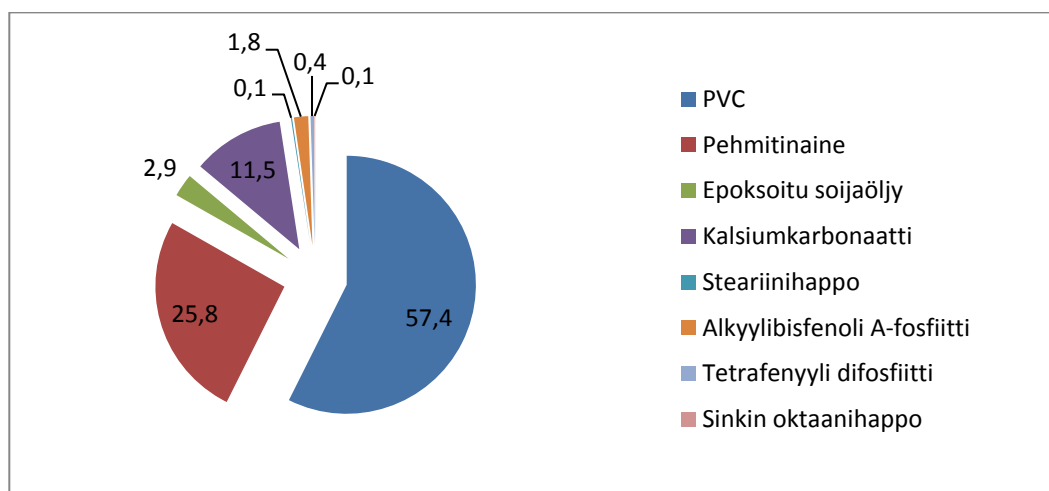
Muita PVC:n lisäaineita ovat seosaineet, pigmentit ja väriaineet, voiteluaineet, iskusitkisteet ja palonestoaineet. Lisäksi käytettäviä lisäaineita ovat UV-absorberit, sumentumisenestoaineet, silloitusaineet, adheesiota edistävät lisäaineet, kirkastusaineet ja sähköisyyttä vähentävät antistaattit. Prosessointia auttavat irroitusaineet ja tarttumisenestoaineet. [27]

3.1.3. Tuotekoostumus

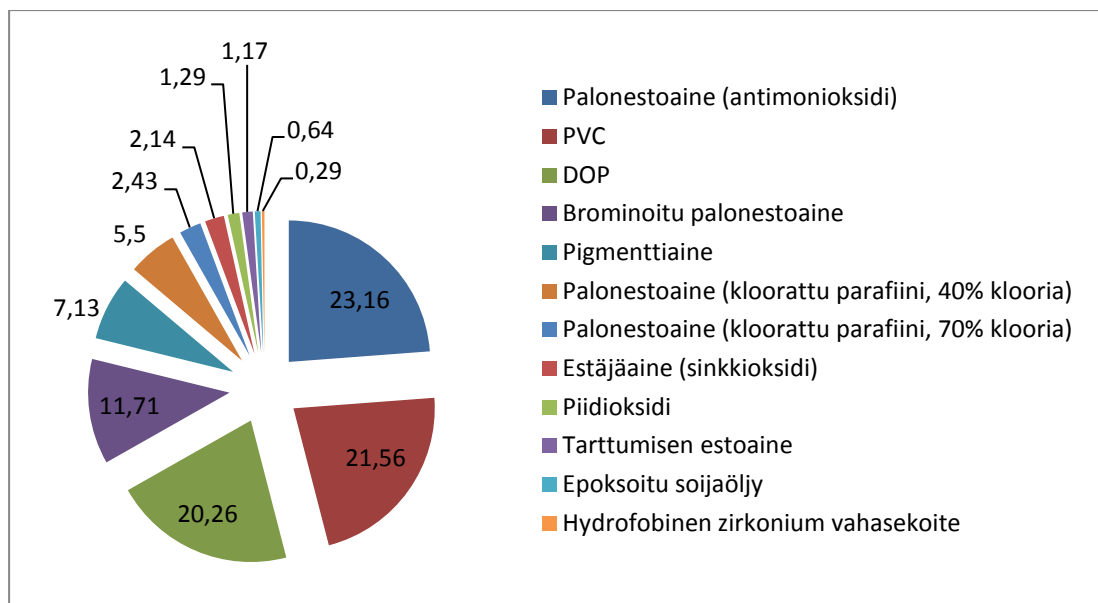
Seoskomponentit ja -osuudet riippuvat tuotteesta. Pehmitetyn PVC-tuotteen keskimääräinen koostumus on arviolta:

- 50 p- % PVC -raaka-ainetta,
- 25 p- % pehmitinaineita ja
- 25 p- % muita lisäaineita. [11]

Kuvissa 3.1. ja 3.2. on esitetty kahden eri tuotteen kemiallinen koostumus painoprosentteina.



Kuva 3.1. Lattiamaton koostumus. [29]



Kuva 3.2. Vedenkestävän kevytpeitteen koostumus. [29]

Lattiamaton painosta huomattava osuus muodostuu PVC -raaka-aineen lisäksi pehmitinaineesta ja kalsiumkarbonaatista. Vedenkestäväksi pinnoitetun kevytpeitteen koostumuksesta nähdään, että huomattava osuus tuotteen painosta muodostuu erilaisista palonestoaineista. PVC -raaka-aineen ja pehmitinaineen (DOP) paino-osuudet ovat lähes yhtä suuret. [29]

3.2. Mekaaniset ominaisuudet

Pehmitinaineet alentavat tiheyttä, joten pehmitetyn PVC:n tiheys on alhaisempi kuin kovan PVC:n. Mitä enemmän seoksessa on pehmitinaineita, sitä alhaisempi on haurastumis- ja lasisiirtymälämpötila. Elastiset ominaisuudet, kuten venymä ja taipuisuus, puolestaan kasvavat pehmitinainetta lisättäessä. Standardoiduilla isku- ja taivutuskokeilla ei onnistuta määrittämään pehmitetylle PVC:lle tuloksia sen elastisuuden vuoksi. [29]

Pehmitinaineita poistuu seoksesta, kun lämpötila nousee tarpeeksi korkeaksi. Lämpötilassa 150 °C yhden tunnin aikana ftalaattipohjaisten pehmittimien (DOA, BBT, DOP ja DINP) poistuma on suurempi kuin epoksoidun soijaöljyn. Pehmitinaineiden häviämiseen prosessoinnissa vaikuttavat pehmittimen tyyppi ja pitoisuus muovissa, prosessointilämpötila, polymeerin ja pehmittimen vuorovaikutus ja termisen hajoamisketjun järjestys. [31]

Normaaliolosuhteissa kloorin ja pehmitinaineiden poistuma on erittäin pientä. PVC:llä veden absorptio on hyvin vähäistä. Käyttölämpötila-alue riippuu pehmittimen määrästä. Haurastumislämpötila on noin -20...-60 °C ja ylin käyttölämpötila jopa lähes 100 °C. [29] PVC:n ominaisuuksia on koottu liitteeseen 2.

Pehmitetty PVC-muovituote ei yleensä syty helposti sen sisältämän kloorin ja palonestoaineiden takia. PVC-muovia poltettaessa vapautuu HCl-höyryä, hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. Palaessa liekki on keltainen, syntyvä savu on tummaa ja pistävän

hajuista. [27] Pehmitetyn PVC:n lämpöarvo on noin 20 MJ/kg, mikä on hieman korkeampi kuin kovalla PVC:llä ja lähes kaksinkertainen yhdyskuntajätteen keskimääräiseen lämpöarvoon. [2]

3.3. Prosessointimenetelmät ja käyttö

Pehmitetyn PVC:n prosessointiin soveltuvat pääosin kaikki muovien prosessoinnissa käytetyt menetelmät. Prosessointimenetelmiä ovat ekstruusio, kalanterointi, ruiskuvalu, rotaatiovalu, kankaiden pinnoitus ja lämpömuovaus. [9]

PVC-tuotteiden käyttöiät vaihtelevat runsaasti käyttökohteensa mukaan. Taulukkoon 3.2. on koottu pehmitettyjä PVC-muovituotteita käyttöikineen.

Taulukko 3.2. Pehmitettyjen PVC-tuotteiden keskimääräiset käyttöiät. [7, 9]

Lyhyt	Keskipitkä	Pitkä	Hyvin pitkä
< 2 vuotta	2 - 10 vuotta	10 - 20 vuotta	> 20 vuotta
Erilaiset kalvot	Erilaiset vesiletkut	Auton lattiamatot	Kaapelinkuoret
Hygieniapakkaukset	Eristeet	Auton aurinkolipat	Kolmikerrosputket
Muovitaskut	Lasten uima-altaat	Auton verhoilu	Lattiamatot
Kansiot	Lattialaatat	Erilaiset letkut	
Lelut	Lattiamatot	Huonekalutekstiilit	
Kengänpohjat	Liikennetolpat	Kaapelinkuoret	
Sadevaatteet	Paineilmaletkut	Lattialaatat	
Suojakäsineet	Pelastusliivit	Lattiamatot	
Veripussit	Pinnoitetut tekstiilit		
Verensiirtoletkut	PVC-hallit		
Telinesuojat	Suojakuomut		
	Tapetit		
	Teltat		

Kertakäyttöisiä tai alle kaksi vuotta käytössä kestäviä tuotteita on painon perusteella vähemmän kuin pitkä tai hyvin pitkäikäisiä. Mitä pitempi-ikäinen tuote on, sitä hankalampi on arvioida sen jätteeksi päätymisen ajankohtaa. [9]

3.4. Pehmitetty PVC-jäte

Syntyvästä post-consumer -jätteestä arviolta 70 % on pehmitettyä PVC-jätettä ja loput 30 % kovaa. Pehmitetyn PVC-jätteen osuuden on ennustettu laskevan Euroopassa 58 %:n tasolle vuoteen 2020 mennessä. Käyttömäärän pienentyminen johtuu pääosin kahdesta syystä: kova PVC-jäte on paremmin mekaanisesti kierrätettävissä ja lisäksi kyseenalaiset lisäaineet ovat vähentäneet käyttöä. Lisäksi pehmitetyn PVC-jättemäärän pieneneminen johtuu myös siitä, että pitkäikäinen PVC on pääasiassa kovaa PVC:tä ja on alkanut nyt päätyä jätteeksi. [2] Kovan ja pehmitetyn PVC-jätteen keskimääräiset koostumukset on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3. PVC-seosten keskimääräiset koostumukset. [2]

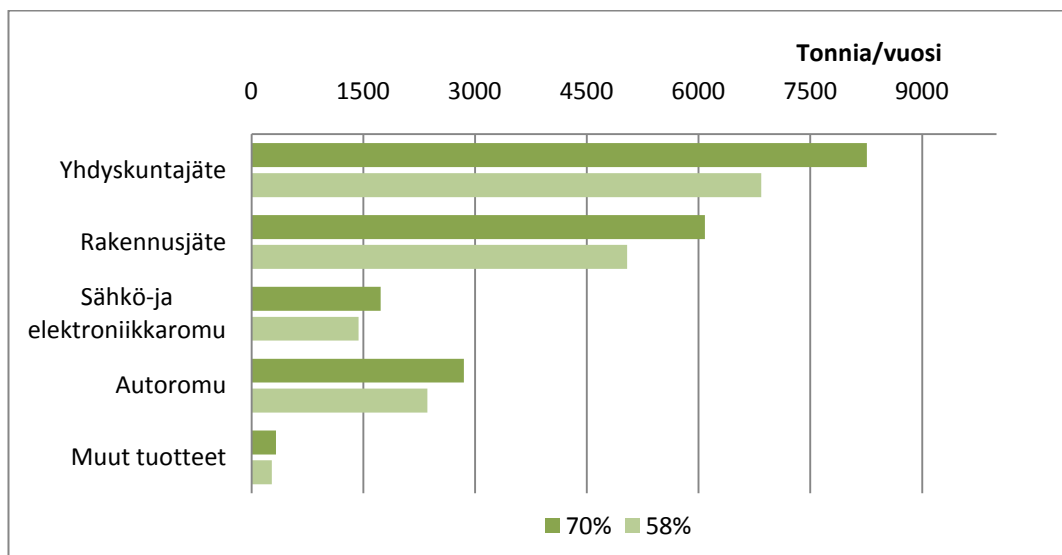
Komponentti	Yksikkö	Kova	Pehmitetty
PVC -raaka-aine	kg/t	950	593
Pehmitinaine	kg/t	0	296
Cd-stabilaattori	kg/t	0.095	0.059
Pb-stabilaattori	kg/t	17	7.1
Täyteaine	kg/t	33	104
Kloori	kg/t	541	338

Taulukosta nähdään, että kovan PVC-jätteen klooripitoisuus on korkeampi ja stabilointiaineiden osuus suurempi kuin pehmitetyllä. Pehmitetyn PVC-jätteen koostumus on hajanaisempi; pehmitin- ja täyteaineiden paino vastaa noin puolta jätteen kokonaispainosta. [2]

3.4.1. Jättemäärä

Mikäli PVC:n post-consumer -jättemääräksi Suomessa oletetaan 25 000...30 000 tonnia vuodessa [9] ja pehmitetyn jätteen paino-osuudeksi puolestaan oletetaan 58 %...70 % [2], pehmitettyä jätettä syntyisi keskimäärin 16 000...19 000 t/v.

Kuvassa 3.3. nähdään pehmitetyn PVC-jätteen jakautuminen syntysektoreittain. Arviossa oletetaan, että post-consumer -jätettä syntyy 28 000 t/v taulukon 2.2. jakauman mukaisesti ja että pehmitetyn osuus kokonaisjättemäärästä on 58 % tai 70 %.

**Kuva 3.3.** Arvio pehmitetyn PVC-jätteen määrästä Suomessa.

Yhdyskuntajätteen mukana pehmitettyä PVC-jätettä on eniten, 6800...8300 tonnia vuosittain, mutta toisaalta se on vaikeasti eroteltavissa ja hyödynnettävissä mekaaniseen kierrätykseen. Arvion mukaan rakennusjätettä syntyisi keskimäärin 5000...6000 t/v. Mekaanisen kierrätyksen kannalta rakennusjätteen hyödyntäminen on varteenotettava vaihtoehto, koska tällä hetkellä se päättyy pääsääntöisesti kaatopaikalle eikä sille ole vastaanottajia. [9]

3.4.2. Hyödynnettävissä oleva jäte

Korjausrakentamisessa syntyvän pehmitetyn PVC-jättemäärän selvittämiseksi tehtiin laskelma syntyvästä post-consumer -jätteestä. Laskelmassa oletettiin tietynkokoisissa Suomen kaupungeissa syntyvän tietty määrä jätettä yhden vuoden aikana. Jätelajeja olivat lattiamatot ja -laatat sekä rakennusten suojauksessa käytetyt säänsuojat ja kevytpeitteet. Purkukohteiksi valittiin asuintalot, julkiset toimitilat ja liikuntatilat. Lisäksi mekaaniseen kierrätykseen soveltuviksi laskettiin erilaisten hallien suojapeitteet ja käytöstä poistuvat venekuomut. Laskelmasta jätettiin pois tällä hetkellä muualle hyötykäyttöön menevä kaapelijäte ja autoromu.

Keräysalueena käytettiin 200 kilometrin säteistä ympyrämäistä aluetta Etelä-Suomen alueella. Keräysalue kattaa 18 suurta kaupunkia ja hieman alle puolet Suomen väestömäärästä. Laskelmassa alueelta kerättävän mekaaniseen kierrätykseen soveltuvan pehmitetyn PVC-jätteen määräksi saatiin karkeasti arvioituna 3000...4000 t/v. Laskelmaa tarkennetaan liitteessä 3.

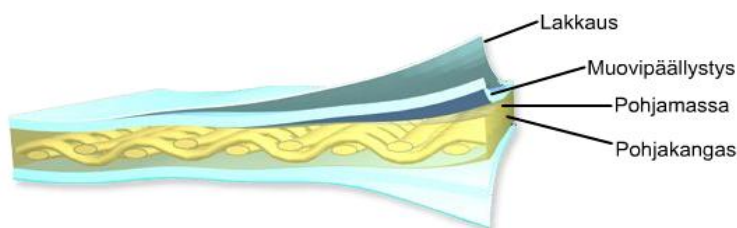
Taulukko 3.4. Arvio mekaaniseen kierrätykseen soveltuvasta jättemäärästä.

Jätejake	Jättemäärä (t/v)
Suojapeitteet	2260
Lattiamatot	1350
Lattialaatat	150
Yhteensä	3760

Laskelman perusteella eniten post-consumer -jätettä syntyy pinnoitetuista kankaista ja toiseksi eniten lattiamatoista (taulukko 3.4.). Aikaisempi esiselvitys pre-consumer -jätteeseen liittyen osoitti vastaavan tuloksen; suurin osa jätteestä syntyi tuotanto- ja asennusvaiheessa pinnoitetuista kankaista sekä lattiamatoista. Seuraavaksi tarkastellaan jätteeksi päätyvien tuotteiden rakennetta ja käyttöä.

3.4.3. Suojapeitteet

Suojapeitteet valmistetaan päällystämällä pohjakangas kalanterointi- tai sivelymenetelmällä. Pohjakankaina käytetään puuvillaa, polyesteriä, polyamidia, polyeteeniä, polypropeenia, aramideja ja lasikuitua. Pinnoitemateriaaleja ovat muun muassa PU, PVC, akryyli- ja silikonipinnoitteet sekä polyolefiinit. Yleisimmin käytetty polymeeripinnoite on PVC. [33, 34]



Kuva 3.4. Kudottu pohjakangas. [33]

Suojapeitteitä on paksumpia kuomu-tyyppisiä ja ohuempia kevytpeitteitä eli pressuja. Suojapeitteissä voidaan käyttää pohjakankaan ja muovipäällysteen lisäksi pohjamassaa ja pinnan lakkausta (kuva 3.4.). Suojapeitteiden yleisimpiä käyttökohteita ovat kone- ja laitepeitteet, kuorma- ja rekka-autojen tavaratilat, rakennussuojat sekä venekuomut. Suojapeitteissä on mukana metalliosia kiinnittämistä varten. [33]

Suojapeitteitä käytetään joko tilapäissuojina tai pitkäaikaisessa suojauksessa. Laitteiden kuljetuksessa ja tilapäisessä ulko-varastoinnissa käytettävät peitteet voivat olla kertakäyttöisiä, kun taas venekuomut voivat olla käytössä vuosia. [33]

3.4.4. Lattianpäällysteet

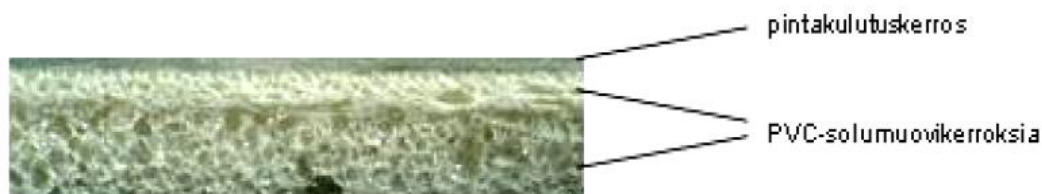
Matoissa ja laatoissa yleisimmin käytetty muovi on PVC, johon on lisätty vaihtelevia määriä lisäaineita. Matot valmistetaan kalanteroimalla tai sivelymenetelmällä. Kalanteroiduista muovimatoista 80 % valmistetaan PVC:stä. Muita muovilattiamattojen valmistusmateriaaleja ovat polyolefiinit ja linoleumi. [35] Lattianpäällysteiden tulee täyttää asetetut ääneneristys-, kosteus- ja paloturvallisuusstandardit [35], minkä vuoksi niissä on runsaasti palonestoaineita. Lattiamatoissa pehmitinaineiden osuus on noin 15 p- % seoksesta ja laatoissa 6 p- % [11].

Lattianpäällysteet voidaan ryhmitellä rakenteensa perusteella homogeenisiin, monikerroksisiin ja heterogeenisiin. [35]

Yksiaineiset eli homogeeniset lattianpäällysteet rakentuvat kokonaan samasta massasta, mutta niissä voi olla useita kerroksia. Maton paksuudet vaihtelevat 1,5–2,5 mm ja niitä käytetään pääasiassa julkisissa tiloissa.

Monikerroksisissa lattianpäällysteissä on kestävä pintakulutuskerros, jonka paksuus vaihtelee 0,2–1,0 mm. Pintakulutuskerroksen alla on yksi tai useampi runsaasti täyteaineita sisältävä kerros. Tyypillisiä käyttökohteita ovat asuin- ja julkatilat sekä kosteat tilat. [35]

Heterogeeniset lattianpäällysteet ovat yleensä pehmeitä alustoja, joissa päällimmäisenä kerroksena on pintakulutuskerros ja alla joustava kerros. Joustava kerros voi olla solumuovia, kuten joustovinyylimatoissa. Joustovinyylimatot koostuvat mineraali- tai lasikuituhuopa-alustasta, jossa on PVC-solumuovikerros, jonka päällä on kohokuvioitu pintakerros (kuva 3.5.). Maton paksuus vaihtelee 2,0–3,0 mm ja paino 1000–2000 g/m². PVC-joustovinyylimattoja käytetään kerros- ja rivitaloissa hyvän äänieristyksen vuoksi. [35, 36]



Kuva 3.5. Poikkileikkaus heterogeenisestä joustovinyylimatosta. [35]

Laatat ovat tyypillisesti homogeenisia ja sisältävät runsaasti täyteaineita, mutta vähemmän pehmitinaineita kuin matot. Laattojen koot vaihtelevat 10×10cm...50×50 cm. Tyypillisesti käyttökohteita ovat julkiset tilat ja teollisuuslattiat. [11, 35]

Asennusvaiheessa syntyvä lattiamattojäte on pre-consumer -jätettä ja purkuvaiheen jäte post-consumer -jätettä. Lattiamattojätteen palakoot vaihtelevat muutamien senttimetrien levyisistä suikaleista metrejä leveisiin rulliin. Lattianpäällystejätteessä on yleensä mukana liimaa, sementtiä ja metallia. [37] Lattianpäällysteiden käyttökohteita ovat:

- Asuinrakennukset: kerros- ja rivitalot
- Julkiset tilat: toimitilat, sairaalat, koulut
- Teollisuustilat: hallit, tuotantolaitokset
- Liikuntatilat: liikuntasalit, kuntosalit, uimahallit [36]

PVC-vapaita lattiapäällysteitä on valmistettu Suomessa 2000-luvulta alkaen korvaamaan vaikeasti kierrätettäviä PVC-lattianpäällysteitä. Teknisten tietojen mukaan tiettyjä matto- ja laattatyyppejä ei saa hävittää polttamalla, vaan ne luokitellaan kaatopaikkajätteeksi. [36]

3.4.5. Erilaiset letkut

PVC-muoviletku voidaan valmistaa joko yhdestä tai useammasta materiaalista. Yksinkertaisimmillaan ekstruusiolla valmistettu PVC-letku sisältää runsaasti pehmitinaineita taipuisuuden lisäämiseksi. Letkuissa käytetään paljon seoksia ja komposiittirakenteita.

Komposiittiletkut koostuvat sisä- ja ulkopinnoista sekä rakenteen sisään jäävästä vahvikkeesta (kuva 3.6.). Vahvikkeena käytetään tekstiilikudoksia, kuten polyesteriä, tai metallilankaa. Letkun ulkopinta voidaan valmistaa eri muovista kuin sisäpinta. Letkun pintamateriaalina käytetään muovien keskinäisiä tai muovien ja kumien sekoitteita. Letkun piiloon jäävän sisäpinnan materiaalina käytetään joissain tapauksissa kierrätysmuovia, kuten puutarhaletkuissa. [38]



Kuva 3.6. PVC-komposiittiletku. [38]

Komposiittiletkuja käytetään vaativammissa olosuhteissa, kuten polttoaineiden ja öljyn siirrossa. Nämä letkut rakentuvat metallivahvisteista, PVC-pinnoitetusta kudoksesta ja pinnalla olevasta muovikalvosta. [38]

3.4.6. PVC-hallit

PVC-halleja käytetään varasto-, tuotanto-, kone- ja urheiluhalleina (kuva 3.7.). Pienimmät hallit ovat autotallin kokoluokkaa ja suurimmat kymmeniä metrejä pitkiä teräsrunkohalleja. Hallien katto- ja seinäverhouksessa käytetään PVC-pinnoitettuja polyesterikankaita. Kangas on palosuojakäsiteltyä ja sisältää yleensä sekä UV-säteilysuojan että homesuojan. [39]



Kuva 3.7. PVC-halli. [39]

Halleissa käytetty pinnoitettu kangas painaa noin 800...900 g/m². Purettaessa 10×10 metrin halli PVC-pinnoitettua kangasjätettä syntyy noin 150 kg. [39]

3.4.7. Muu jäte

PVC-jätettä syntyy lisäksi terveydenhuollosta, autoromusta, sähkö- ja elektroniikkatuotteista sekä kuluttajatuotteista, kuten huonekaluista. Terveystuotteiden veripussit ja verensiirtoletkut sekä suojakäsineet jätetään mekaanisen kierrätyksen ulkopuolelle lähinnä terveydellisten syiden takia. Verta sisältävä muovijäte soveltuu hyvin energiahyötykäyttöön. [9]

Tuotteet, kuten sadevaatteet, markiisikankaat, tapetit tai teltat päätyvät kuluttajilta yhdyskuntajätteeseen, minkä jälkeen niitä on vaikea erotella mekaaniseen kierrätykseen. PVC-mainoslakanat, suurissa telttarakenteissa käytetyt katteet ja autoverhoilukankaat olisivat sen sijaan kerättävissä kierrätykseen. [6]

4. PEHMITETYN PVC-JÄTTEEN HYÖDYNTÄMINEN

Uusiomuovia on valmistettu Suomessa kolmenkymmenen vuoden ajan, mutta ala erikoistui ja kehittyi teknisesti 1990-luvulla. Helpot jätekertymät, kuten pakkaus- ja maatalouskalvot ja PET-pullot on Suomessa jo kerätty kierrätettäväksi. [1]

Monikäyttöisen PVC-muovin imago on huonontunut vuosien varrella, kun useat tutkimukset ovat osoittaneet tiettyjen pehmitinaineiden ja stabilisaattorien olevan haitallisia ympäristölle ja terveydelle. Negatiiviset asenteet ja mielikuvat PVC:stä voivat vaikuttaa osaltaan kiinnostukseen kierrätystä kohtaan.

Kaapelijätteen osalta kierrätyksen kannattavuus perustuu arvokkaan kuparin talteenottoon. Kovat PVC-putket on otettu Suomessa mekaanisen kierrätyksen piiriin, mutta pehmitetyt PVC-tuotteet ovat rakenteeltaan monimutkaisempia ja vaikeammin kierrätettävissä. Koska PVC:n paino-osuus pehmitetyssä tuotteessa on pieni, jää kierrätyksessä saatavan PVC:n määrä alhaiseksi. [4, 32]

Kemiallinen hyödyntäminen on varteenotettava vaihtoehto vain silloin, mikäli mekaaninen hyödyntäminen ei ole mahdollista. Jätteenpoltossa PVC-jätteen poltto lisää käyttökustannuksia, koska poltossa vapautuva suolahappo on neutraloitava neutralointiaineella ja tuhkat loppusijoitettava. [7]

4.1. Käytön ja prosessoinnin vaikutus muovimateriaaliin

Uusiomateriaalina käyttö riippuu alkuperäisen tuotteen käyttäjästä ja käyttökohteesta. Käytössä muoviin vaikuttaa useita haitallisia ja vaurioittavia tekijöitä, joiden yhteisvaikutusta tuotteeseen on hankala määrittää. Tämä puolestaan vaikeuttaa tasalaatuisen lopputuotteen takaamista ja käyttökohteen tarkkaa rajausta. [32] Käytön ja prosessoinnin aiheuttamia haitallisia vaikutuksia voivat olla:

- epäpuhtaudet (muovijäännökset, mineraalit),
- muutokset virtausominaisuuksissa,
- heikentynyt lämpö- ja UV-stabiliteetti,
- muutokset keskimääräisessä molekyylipainossa tai molekyylipainojakaumassa,
- epähomogeenisyys ja
- kontaminaatiot.

Käytössä muovimateriaaliin vaikuttavia tekijöitä ovat lämpö, säteily, kuluminen, aika, kemiallinen ympäristö, mekaaninen kuormitus ja ilmasto. Koska UV-säteilyn absorboituminen muovimateriaaliin heikentää sen ominaisuuksia, auringonvalolle altistuvissa tuotteissa käytetään runsaasti UV-absorbereita. [32] Pitkäikäisten

muovituotteiden stabilointiainemäärät on tarkoitettu kestämaan kyseisen tuotteen käyttöiän, jolloin uusiomateriaalista valmistettava tuote voi edellyttää uudelleen stabilointia. [40]

4.2. Kierrätysmateriaalin vaikutus prosessointiin

Kierrätysmateriaalin vaikutukset prosessointiin, lujuusominaisuuksiin ja tuotteen muihin ominaisuuksiin ovat yleensä pienet kierrätysmateriaalimäärän pysyessä alle 30 %:ssa. Kunkin muovilajin ominaisuuksien muutokset ovat erilaiset ja riippuvat prosessointihistoriasta ja stabiiliudesta. [40]

Jokaisella prosessointikerralla kestopuovien ominaisuudet muuttuvat jonkin verran suurten leikkausvoimien, korkean lämpötilan ja jäännöshapen vaikutuksesta. Polymeerin molekyyliketjuissa tapahtuu pilkkoutumista ja ristisilloittumista. [31, 40]

Mahdollisia kierrätys-PVC:n uudelleen prosessointiin liittyviä ongelmia voivat olla värinmuutokset, prosessointikäryt, voimakas tuoksu tuotteessa, ristisilloittuminen ja pehmittimien migratoituminen. [4] Polymeeriketjujen pilkkoutuminen laskee sulaviskositeettia eli polymeerisulasta tulee juoksevampi ja nopeammin virtaava materiaali. Ketjujen pilkkoutuminen aiheuttaa yleensä moolimassajakauman levenemisen, mikä puolestaan tekee materiaalista leikkausohenevampaa. Tällöin muotin täyttöaste kasvaa ja ruiskuvalussa voi ilmetä purseita. [40]

4.3. Mekaaninen kierrätys

Mekaanisen kierrätyksen perusedellytyksiä on, että syötemateriaali soveltuu mekaaniseen kierrätykseen, jätemäärä on riittävä ja lopputuotteelle on olemassa hyötykäyttökohteita kierrätyksen jälkeen. Teknisten ja taloudellisten syiden vuoksi käsittelylaitoksen (mukaan lukien keräys- ja logistiikkajärjestelmä) minimikapasiteetiksi on arvioitu 5000 t/v. [6]

Post-consumer -muovijätteen mekaanisen kierrätyksen vaiheet vaihtelevat tapauskohtaisesti, mutta etenemisvaiheet ovat tyypillisesti seuraavat:

- Jättesisällön tarkastus
- Esilajittelu
- Jättemuovin murskaus, jauhatus ja pesu
- Kellutusallas: tiheyteen perustuva erottelu, siinä tapauksessa mikäli eri muovilaatuja ei muuten erotella
- Kuivaus: muovipellettien tulee olla kuivia, jottei kosteus heikennä lopputuotteen laatua
- Sulatus: lämpö ja paine sulattavat muovin ekstruuderissa
- Sulasuodatus: muovisula pakotetaan seulan läpi, jolloin kaikki pesussa jääneet epäpuhtaudet poistetaan
- Rakeistus: nauhat jäähdytetään ja pilkotaan rakeiksi myyntiä varten [41]

Vaikka pehmitetyn PVC:n kierrättäminen edellä esitetyllä tavalla olisi teknisesti mahdollista ainakin lattiamatoille, menetelmä on kallis ja jäte vaatii paljon esikäsittelyä. [42] Perinteistä mekaanista kierrätystä vaikeuttaa se, että prosessin syöte on epähomogeenista komposiittijätettä, eikä koostu yksittäisestä materiaalista, kuten esimerkiksi PVC-putket. Komposiittimateriaaleilla muovimatriisin ja kuitujen välinen hyvä adheesio pitää komponentit tiiviisti kiinni toisissaan, jolloin eri materiaalien erottaminen toisistaan vaikeutuu. Lisäksi kierrätettävyyttä vaikeuttavat lisä- ja täyteaineiden vaihtelevuus ja suuret tuotekohtaiset pitoisuudet. Pelkästään yhden tuotteen painosta lähes puolet koostuu erilaisista lisäaineista (kuva 3.1.). Kierrätyskelpoinen heterogeeninen jättemateriaali sisältäisi tällöin useita tuhansia lisäaineita eri pehmitinaineiden lisäksi.

Kestomuovien granulointi tarkoittaa pelletointi- tai rakeistusprosessia. Materiaali ensin plastisoidaan, ajetaan ekstruuderin avulla jatkuvaksi nauhaksi, nauha jäädytetään ja pilkotaan tiettyyn kokoon. Varsinainen granulointi tehdään erityyppisillä leikkureilla ja granuloinnin yhteydessä materiaaliin voidaan sekoittaa lisä- ja apuaineita. [27]

Post-consumer -kierrätysmateriaalin lisäainesisältö on yleensä heterogeenista, minkä vuoksi joissain tapauksissa uusioraaka-aineen valmistusvaiheessa seokseen lisätään entisestään lisäaineita. Lisäaineistuksella pyritään pienentämään lisäaineiden eräkohtaista vaihtelua. Täyte- ja lisäaineilla voidaan muun muassa parantaa uusiomateriaalin prosessoitavuutta, stabiloida ympäristöä ja vanhenemista vastaan, lisätä lujuutta sekä vaikuttaa uusiomateriaalin väriin. [1, 27]

Tähän mennessä pehmitetyn PVC:n uusiokäyttö alkuperäisessä käyttökohteessaan rajoitetuilla pitoisuuksilla on onnistunut ainakin lattiamattojen, suojapeitteiden, kaapeleiden ja monikerroksisten letkujen osalta. [32] Luvussa 5 perehdytään tarkemmin mekaanisen kierrätysprosessin murskaus- ja erotusmenetelmiin.

4.3.1. Uusiomateriaali

Mekaanisessa kierrätyksessä voidaan valmistaa hyvälaatuisia tai heikompilaatuista uusiomateriaalia. Hyvälaatuisen lopputuotteen saamiseksi jäte on kerättävä sovelluskohteittain sekä kova ja pehmeä PVC kierrätettävä erikseen. [6]

Hyvälaatuisella lopputuotteella tarkoitetaan uusiomateriaalia, jota voidaan käyttää uudelleen samoissa PVC-sovelluksissa. Hyvälaatuisella uusiomateriaalilla voidaan korvata neitseellistä materiaalia, ja sen suurin saatava hinta riippuu neitseellisen materiaalin markkinahinnasta. [6] Heikompilaatuisella ”downcycling” lopputuotteella tarkoitetaan eri PVC- tai muovilaaduista koostuvaa uusiomateriaalia, jota voidaan käyttää korvaamaan myös muita materiaaleja kuin PVC:tä. [6]

Uusiomuoveille on asetettu tarkat laatuluokitukset. [1] Valmistettaessa uusiomateriaalia polyvinyylikloridista laatuvaatimusten perustana voidaan käyttää seuraavia tekijöitä:

- K-arvo
- Pehmitetty ja kova PVC
- Väri
- Koon pienentäminen ja hienoksi jauhaminen
- Stabilointiaineiden yhteensopivuus
- Vieraiden aineiden kontaminaatio [32]

Jotta uusiomateriaali saavuttaisi siltä vaaditut ominaisuudet, siinä voidaan käyttää lisäaineita. Yhteensopivuuden varmistamiseksi muiden muovityyppien kanssa voidaan käyttää kompatibilisaattoreita. Yksi tapa saavuttaa lopputuotteelta vaaditut ominaisuudet on lisätä neutraalista materiaalia runsaasti seokseen. [32] Kierrätysmateriaali voi tuoda mukanaan tuotteeseen värinmuutoksia lähinnä stabilisaattoreiden keskinäisen vaikutuksen takia. Taulukossa 4.1. on esitetty PVC-muovissa käytettyjen eri stabilaattoreiden keskinäisiä vaikutuksia.

Taulukko 4.1. Eri stabilaattoreiden välisiä mahdollisia värireaktioita. [32]

Stabilaattoreiden yhdistelmä	Reaktiotuotteen väri
Ba/Cd + SnS	Keltainen kadiumsulfidi
Pb + SnS	Ruskea tai musta lyijysulfidi
Sb + SnS	Oranssi antimonisulfidi
Ca/Zn + SnS	Valkoinen sinkkisulfidi
Ba/Cd + Pb	Valkoinen sinkkisulfidi
Ba/Cd + Pb	Ei ongelmia
Ba/Cd + Ca/Zn	Ei ongelmia
Ca/Zn tai Ba/Zn + Pb	Ei ongelmia

Koska mekaanisen kierrätyksen kannattavuus riippuu keskeisesti lopputuotteesta, tulisi uusiomateriaalin olla mahdollisimman hyvälaatuista. Sekä hyvä- ja heikompileatuisen uusiomateriaalin laatu puolestaan riippuu siitä, kuinka hyvin PVC saadaan eroteltua muusta jätteestä. Kierrätysmateriaalin menekkiin puolestaan vaikuttavat hinta, laatu, saatavuus ja kysyntä sekä näiden tekijöiden väliset yhteydet. [6, 32]

4.4. Esimerkit mekaanisesta kierrätyksestä

Euroopassa toimivat mekaaniseen kierrätykseen erikoistuneet laitokset ottavat vastaan vain tiettyä jätelajia. Keski-Euroopan maiden väliset lyhyet välimatkat mahdollistavat jätteenkeräyksen joissain tapauksissa myös naapurimaista. [6] Erikoistuneet kierrätyslaitokset tekevät tyypillisesti yhteistyötä alan valmistajien kanssa. [37]

Pehmitetylle PVC-jätteelle tarkoitettuja kierrätysprosesseja ei ole kuvattu kirjallisuudessa eikä yritysten sivustoilla yksityiskohtaisesti, jolloin prosesseista ei välttämättä saada kaikkea kierrätystoiminnan kannalta olennaista tietoa.

Saksassa ROOFCOLLECT -kierrätysysteemi kerää ja kierrättää suuria pehmeitä suojakatteita. Suojakatteista irrotetaan metalliosat syntypaikalla, pakataan tiiviisti kuljetusta varten, murskataan ja kierrätetään erityisellä Jutta Hoser - ruiskuvalumenetelmällä, jossa kierrätysmateriaalista valmistetaan samalla linjalla uusiotuote. Uusiotuotteena valmistetaan lattialevyjä ja kuivatuskerroslevyjä ratsastuskentille ja -talleille sekä urheilukentille. [43]

EPCOAT -projektissa kierrätettiin pinnoitettuja kankaita, kuten markiisikankaita, mainoslakanoita, tekonahkaa ja suojapeitteitä. Keräyskustannukset osoittautuivat kierrätyksen esteeksi, vaikka jäte pyrittiin keräämään kerralla suuriin 1,1 tonnin suursäkkeihin. [12]

4.4.1. AgPR

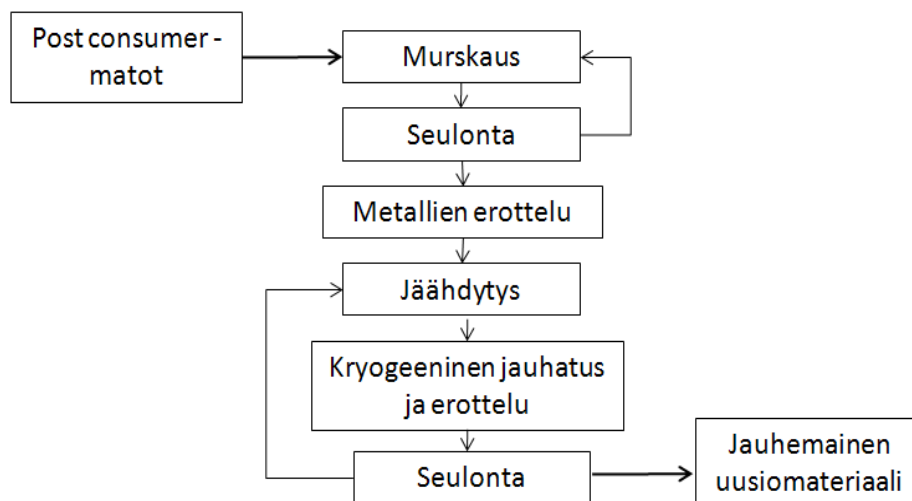
AgPR (Die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling) on lattianpäällysteiden mekaaniseen kierrätykseen erikoistunut kierrätyslaitos Troisdorfissa, Saksassa. Kierrätyslaitoksessa käsitellään arviolta noin 2 % Saksassa syntyvästä lattianpäällystejätteestä. Kapasiteetti riittäisi käsittelemään 4000 – 5000 t/v, mutta vuosittainen käsittelymäärä on noin 1700 t/v. [37]

Jäte kerätään yli sataan keräyspisteeseen ympäri Saksaa, joissa jäte tunnistetaan ja lajitellaan ennen AgPR:lle toimitusta. Jätteen vastaanottamisesta osakkailta peritään sopimuskohtainen hinta ja muilta jätteen toimittajilta markkinoiden mukaan määräytyvä hinta. Vastaanottohintaan vaikuttavat muun muassa keräyspaikan sijainti ja sen hetkiset vaihtoehtoisen energiahyödyntämisen markkinat. Jäte kerätään pääosin purkutyömailta, mutta myös kuluttajilla on mahdollisuus toimittaa jäte keräyspisteeseen.

Prosessi alkaa tunnistamalla jäte oikeanlaiseksi silmämääräisesti ja nostamalla kahmarin avulla jätettä kuljettimen eteen, josta manuaalisesti jäte lajitellaan kuljettimelle. Jätteen kelpaavat yksikerroksiset päällysteet, päällysteet, joissa sekä ylä- ja alapinta PVC:tä, vaahdotetut PVC-päällysteet sekä PVC-seinäpäällysteet. Tunnistuksessa voidaan käyttää lisäksi laboratoriotestausta, repimiskoetta tai palotestausta.

Työ tehdään yhdessä vuorossa. Käytännössä yksi henkilö käyttää 75 % työajastaan jätteen lajittelemiseksi telakuljettimelle. Automaattista NIR-lajittelua ei käytetä, koska se ei sovellu tumman PVC:n tunnistamiseen.

Käsittelyprosessin päävaiheet ovat lajittelu, karkea murskaus alle 3 cm:n lastuiksi, metallien magneettinen erottelu, liiman ja sementin irrotus vasaramurskaimella, seulonta, murskeen hetkellinen hauraaksi jäädyttäminen nestetypellä, hienojauhatus, tärinäerottelu (kuva 4.2.), homogenisointi ja annostelu säkkeihin. Prosessin yksinkertaistettu kaaviokuva on esitetty kuvassa 4.1. [37]



Kuva 4.1. AgPR:n lattiapäällysteiden kierrätysprosessi. [6]

Prosessin tärkeimmät vaiheet ovat hienojauhatus ja sitä seuraava tärinäerottelu. Hienojauhatuksessa kustannuksia syntyy nestetypen käytöstä ja käsittelykapasiteetin 2 t/h laskemisesta yhteen tonniin tunnissa. Tärinäerottelussa erotellaan hienojakoinen PVC, polyesterikuitupallot ja liian suurikokoiset rakeet takaisin jauhattaviksi.



Kuva 4.2. Vasaramurskaus ja tärinäerottelu. [37]

Lopputuotteesta AgPR takaa raekoon ($<400\ \mu\text{m}$). Koska prosessissa ei pestä muovia, kosteutta ei pääse imeytymään lopputuotteeseen. Lopputuote on väriltään harmaata ja soveltuu uudelleenkäytettäväksi lattiapäällysteissä. Muita käyttökohteita uusiomateriaalille ovat tiivistet, puutarhaletkut ja liikennetolpat.

Saksan valtio ja lainsäädäntö eivät varsinaisesti tue AgPR:n kierrätystoimintaa, vaan sekä lattiapäällystevalmistajien yhteisö EPFLOOR ja Vinyl2010 -projektista seurannut Recoviny -ohjelma rahoittavat kierrätystoimintaa. [37]

4.4.2. Vinyloop®

Vinyloop -prosessi on erityisesti pehmitetylle PVC-jätteelle kehitetty liukoisuusominaisuuksiin perustuva käsittelyprosessi. Käsittelymenetelmä kuuluu mekaanisiin kierrätysmenetelmiin, vaikka liuotus on prosessin keskeisin vaihe. Selektiivinen liuotus erottaa PVC:n matriisista, eikä PVC-raaka-aineen kemiallinen rakenne muutu. [41]

Menetelmä soveltuu etenkin komposiittimateriaaleille, joista ei saada perinteisillä jauhatusmenetelmillä riittävän laadukasta lopputuotetta. Jätteeksi kelpaavat kaapelit, kattomateriaalit, lattiamatot, ikkunat, kalvot ja polymeerijäte. Vinyloop -prosessista saatava korkealaatuinen regeneroitu materiaali sopii raaka-aineeksi uusien tuotteiden valmistukseen korvaamaan neitseellistä materiaalia. [41]

Kierrätysprosessin vaiheet ovat esikäsittely, liuotus, saostus, kuivatus ja liuottimen talteenotto:

- Esikäsittelyssä materiaali murskataan pienempään palakokoon repijöillä, leikkureilla ja myllyillä.
- Liuotuksessa jätteeseen lisätään suljetussa reaktorissa selektiivistä liuotinta, joka vapauttaa PVC -raaka-aineen matriisirakenteesta. Kaikki lisäaineet ja epäpuhtaudet joko liukenevat tai ovat suspensiona nesteessä.
- Erotteluvaiheessa liuos suodatetaan ja liukenematon jae erotellaan.
- Saostuksessa liuotin haihdutetaan höyryn avulla. PVC saostuu ja tässä vaiheessa voidaan lisätä lisäaineita.
- Kuivatus tehdään uuttamalla vesi pois lietteestä. Kuivatuksen jälkeen regeneroitu PVC on valmis käytettäväksi. [41, 44]

Dekantterin avulla poistetaan pienet epäpuhtaudet PVC-jaoksesta. Vesiliete kuivatetaan kuumalla ilmalla ja prosessivesi kierrätetään puhtaaksi. Liuotin kierrätetään höyryn avulla suljetussa prosessissa 99,9-prosenttisesti. Vinyloop -prosessikaavio on esitetty liitteessä 4.

Lopputuotteena saatavasta korkealaatuisesta R-PVC lopputuotteesta analysoidaan kontaminaatioaste, rakeisuus, bulkkitiheys ja haihtuvien aineiden osuus. Mekaanisista ominaisuuksista määritetään tiheys, Shore A -kovuus, murtolujuus ja venymä. Kaikki alkuperäisen PVC:n sisältämät komponentit säilyvät R-PVC:ssä, paitsi liukenemattomat komponentit. Ainoastaan poikkeustapauksessa PVC voidaan erottaa muista alkuperäisistä komponenteista. [44]

Italian Ferrarassa sijaitseva tehdas on ollut täysimittaisesti toiminnassa vuodesta 2002. Kierrätettävän jätteen määrä on kasvanut tasaisesti; vuonna 2008 jätettä vastaanotettiin 11 500 tonnia, josta myytävää kierrätysmateriaalia valmistettiin 9000 tonnia. [44] Toinen Vinyloop -tehdas (kapasiteetti 18 000 t/v) on aloittanut toimintansa Japanissa vuonna 2007, mutta sen toiminta-aste on vain 50 % kapasiteetista vähäisen jätemäärän vuoksi. [45, 46]

Prosessin edut kannattavuuden osalta on, että R-PVC voidaan lisäaineistaa asiakkaan tarpeen mukaan ja hyötykäyttöaste on korkea. Huono puoli menetelmässä ovat suuret investointikustannukset. Jätteestä perittävä vastaanottomaksu on 350 €/t. [44, 47]

4.4.3. Taxyloop®

Taxyloop -prosessi pohjautuu Vinyloop -prosessiin, mutta on tarkoitettu erityisesti PVC -pinnoitettujen polyesterikankaiden kierrätykseen. Syötemateriaali on kuitupitoista, ja kuitukontaminaation välttämiseksi pressut lajitellaan huolella. Prosessin vaiheet ovat vastaavat kuin Vinyloop -prosessissa, mutta liuotin liuottaa PVC-kompaundin eikä kuituja.

Pressujen kierrätys aloitettiin uudelleen vuonna 2009 rajoitetulla 2000 t/v määrällä dekanterin vaihdon jälkeen. Tällä hetkellä kierrättämällä 1000 kg:n verran suojapeitejätettä lopputuotteena saadaan 580 kg R-PVC:tä, 410 kg kuituja ja 10 kg dekanterijätettä. [48]

4.5. Terminen ja kemiallinen hyödyntäminen

PVC:n termisessä hyödyntämisessä on tavoitteena hyödyntää hiilivetyjen energiasisältö ja saada PVC:n sisältämä kloori talteen jossain muodossa. Usein kloori otetaan talteen suolahappona, jota voidaan käyttää raaka-aineena muissa prosesseissa. [45]

Muovien kemiallisessa kierrätyksessä polymeeriketju pilkotaan monomeereiksi ja prosessissa pyritään ottamaan raaka-aineet talteen. PVC:n kemiallisessa kierrätyksessä tämä tarkoittaa joko kloorin tai hiilivetyjen talteenottoa, tai molempien raaka-aineiden talteenottoa jossain muodossa. [32]

Termiset ja kemialliset hyödyntämismenetelmät ovat usein päällekkäiset: kemiallisessa kierrätyksessä saadaan sivutuotteena usein energiaa ja termisessä hyödyntämisessä syntyy puolestaan klooria. Raaka-ainekierrätysmenetelmiä ovat kaasutus, pyrolyysi ja hydrolyysi. [32]

PVC soveltuu korkean lämpöarvonsa takia käsiteltäväksi termisillä ja kemiallisilla menetelmillä. Hyödyntämistä varten tehdään yleensä jako PVC-rikkaaseen ja PVC-köyhään fraktioon. PVC-rikkaassa fraktiossa PVC:n osuus jätteestä on vähintään 30 %. Prosessiin syötettävän kloorin määrä on tarkoin määritetty sekä kustannussyistä että HCl:n korrodoivasta vaikutuksesta. [49]

Jätteen esikäsittelyllä pyritään pitämään halogeenipitoisen jätteen määrä sallituissa rajoissa. Esikäsittely voi olla lajittelu- ja erotteluvaihe tai vaihtoehtoisesti terminen tai kemiallinen dehalogeenointi ennen prosessointia. Hydrogenoitu happo neutralisoidaan tai erotetaan teollista käyttöä varten. Keskeisin vaihe eri menetelmissä on HCl:n pesu niin, että sitä voidaan käyttää uudelleen PVC:n valmistuksessa tai muissa kemiallisissa prosesseissa. [49]

Prosesseja klooripitoisen jätteen käsittelemiseksi on kehitetty useita, mutta monet ovat kehitys- tai pilottivaiheessa, kuten Sumitomo Metals Japanissa. Euroopassa aiemmin toimineita laitoksia on lopetettu taloudellisen kannattamattomuuden takia. [49]

4.5.1. MVR Hamburg

MVR Müllverwertung Rudenberg Damm GmbH & Co. KG on moderni yhdyskuntajätteen polttoon erikoistunut laitos, jossa jäte hyödynnetään energiana ja raaka-aineet otetaan talteen. Laitoksen kapasiteetti on 320 000 t/v ja se on rakennettu kestävämpään tavallista suurempi HCl -pitoisuus savukaasuissa. PVC-jätettä voidaan lisätä yhdyskuntajätteeseen 2 % ilman ongelmia.

Jäte poltetaan vähintään 850 °C asteessa. HCl otetaan savukaasuista talteen kaksivaiheisella happopesuprosessilla ensin 12-prosenttisena liuoksena, tislataan ja konsentroidaan 17 %:n vahvuiseksi, desorptoidaan kalsiumkloridilla ja adsorptoidaan tislattulla vedellä 30 % konsentraatioon.

Lopputuote HCl käytetään tehtaassa ja myydään kemian teollisuuteen, rakennussektorille tai voimalaitoksiin, savukaasunpuhdistuksen pohjatuhka hyödynnetään tie- ja kaivosrakentamisessa ja metallit toimitetaan teollisuuden raaka-aineeksi. Kipsi hyödynnetään rakennusteollisuudessa. [45]

4.5.2. Dow/BSL

Saksassa Schokopaussa toimivassa Dow/BSL -kiertouunipolttolaitoksessa käsitellään klooripitoista (PVC-pitoisuus noin 30 %) jätettä 45 000 t/v. Prosessivaiheet ovat esikäsitely, poltto rumpu-uunissa 950 °C-asteessa, jälkipolttu 1100 °C-asteessa, energian talteenotto höyrystä, savukaasujen jäähditys ja puhdistus vedellä. Tavoitteena on estää furaanien ja dioksiinien muodostuminen täydellisellä palamisella.

Korkealaatuinen HCl otetaan talteen märkäpesurilla ja se soveltuu hyödynnettäviksi useissa erilaisissa tuotantoprosesseissa. Pohjakuonaa käytetään täyteaineeksi kaivoksiin ja jäteveden käsittelysakka prosessoidaan kiertouunissa kuonaksi tai läjitetään kaatopaikalle.

Syötemateriaali koostuu pinnoitetuista kankaista (41 %), lattiapäällysteistä (39 %), plastisoleista (7 %), ikkunaprofiileista (7 %) ja kaapeleista (6 %). Kiinteät ja nestemäiset klooripitoiset jätteet syötetään sekoituksena. Polttolaitoksen etuja on, että jätettä pystytään käsittelemään suuria määriä ja syötteeksi kelpaa sekä kova että pehmitetty PVC. Vaikka laitos sijaitsee Keski-Saksassa ja Euroopan sydämessä, jätteestä peritään vastaanottomaksua 250 €/t, koska esikäsitely- ja logistiikkakustannukset ovat korkeat (350–500 €/t). [45]

Prosessissa klooripitoisuus ei ole varsinaisesti kriittinen tekijä, mutta 100 %:n PVC-jätteen syöttäminen aiheuttaisi lämpöarvon nousuun ja ongelmia lämpötilan kontrollissa. Niin kauan kun lämpöarvo pysyy sallituissa rajoissa, klooripitoisuutta voidaan nostaa 50 % asti. [47]

5. MURSKAUS- JA EROTTELUMENETELMÄT

5.1. Murskaus

Jätteenkäsittelyssä murskauksen tarkoituksena on lisätä jätteen homogeenisuutta ja edistää jatkokäsittelyä, kuten jauhatusta. Palakoon pienentäminen 15–20 mm hienommaksi luetaan useimmiten jauhatukseen kuuluvaksi, vaikka ero onkin liukuva. Yleensä murskain kytketään seulontaan siten, että seulan läpäissyt alite jatkaa seulasta edelleen ja ylite palautetaan uudelleen murskaimeen. Muoveilla seulonta on yleensä kahden murskausvaiheen välissä. [50]

Yksikköoperaationa murskaus kuluttaa runsaasti energiaa. Suuri osa energiasta tuhlautuu kimmoisiin muodonmuutoksiin ja muuttuu lämmöksi, joten suurin osa käyttökustannuksista muodostuu energian hinnasta. [50] Muovimateriaalien, kuten pehmitetyn PVC-muovin murskaus onnistuu yleensä helpommin, kun materiaali on kylmä ja hauras. [37]

Murskaus on yleensä prosessin ensimmäinen vaihe esilajittelun jälkeen. Esilajittelussa on poistettava suuret betonipalat, kivet ja metallikappaleet, jotka voivat vahingoittaa murskainta. [50] Muovijätteiden murskauksessa metallien erottelu on erittäin tärkeää. [32]

Raemaisten materiaalien murskaukseen voidaan käyttää iskua tai puristusta, kun taas kuitumaisiin materiaaleihin on käytettävä repijätyyppistä laitetta. Murskaimen valinta jätteenkäsittelyyn on syytä tehdä huolellisesti, sillä kustannukset nousevat nopeasti tehontarpeen kasvaessa. [50]

5.2. Murskain- ja jauhatustyypit

Murskaimet voidaan jaotella karkeusasteen perusteella karkeisiin murskaimiin, välikoon murskaimiin ja myllyihin sekä hienoihin jauhimiin. Jätteenkäsittelyssä tärkeimmät murskaintyyppit ovat leukamurskain, iskumurskain, vasaramylly, repijätyyppiset myllyt ja ruuvimurskain. Myös valssimurskainta käytetään muoveilla ja kierrätettävällä kumilla. Murskaintyyppin valintaan vaikuttavat jauhattavan materiaalin ominaisuuksien lisäksi syötön ja lopputuotteen kokojakauma. [50]

5.2.1. Leukamurskain

Leukamurskaimessa materiaali rikkoutuu joutuessaan alasimen ja nopeasti liikkuvan leuan väliin. Liikkuva leuka jauhaa edestakaisin 1.5...6 kertaa sekunnissa ja leukojen pituus on yhdestä kolmeen metriin. Jauhetun materiaalin raekoko on 40–50 mm.

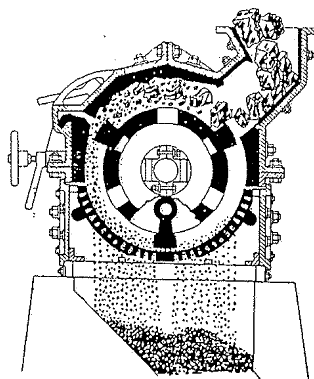
Leukamurskain soveltuu rakennusjätteen esimurskaukseen ja sitä käytetään yleensä koville materiaaleille. Maksimikapasiteetti voi olla 1000 t/h. [50]

5.2.2. Iskumurskain

Iskumurskaimessa on vaakasuorassa pyörivä rumpu, jossa iskunystyrät tai -palkit murskaavat materiaalia. Rumpu heittää murskattavan aineen kohti vastalevyjä. Rummun halkaisija on suurimmillaan kaksi metriä ja pyörimisnopeus 500 rpm. Iskumurskaimessa ei ole seulaa kuten vasaramyllyssä. Iskumurskaimia käytetään rakennusjätteelle ja romulle. Kapasiteetit vaihtelevat 15–1500 kg/h. [50]

5.2.3. Vasaramylly

Vasaramyllyssä roottorissa olevat saranoidut vasarat hajottavat syötetyn kappaleen joko iskun voimasta tai jauhaessaan ainetta pesän vastakappaleita vasten (kuva 5.1.). Vasaramyllyjä on useita eri tyyppisiä, mutta tyypillisesti myllyn alaosassa seulotaan ylikokoiset kappaleet. Syötemateriaalin koko on 5-30 mm ja jauhetun tuotteen 0,8–25 mm. Pyörimisnopeus vaihtelee 900...16 000 rpm. Tuotteen hiukkaskoko riippuu roottorin pyörimisnopeudesta, vasaran ja vastakappaleen välisestä etäisyydestä ja seulan koosta. Suurella nopeudella myllyt tekevät varsin hienoa tuotetta. Kapasiteetti vaihtelee 0,1–15 t/h. [50]

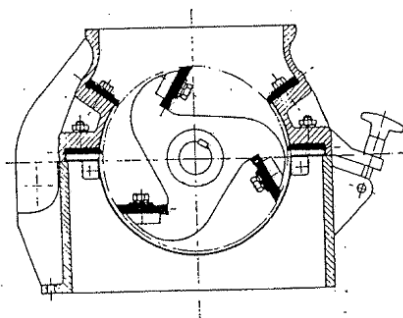


Kuva 5.1. Esimerkki vasaramyllystä. [50]

Vasaramyllyä voidaan käyttää hauraiden muovien (PS, PVC-U) murskaukseen [32], mutta myös pehmitetylle PVC:lle. [37] Hyviä puolia ovat vaihteluiden ja vieraiden aineiden hyvä kestävyys. Huonoja puolia ovat suuri energiankulutus, suuri pölyn määrä ja lopputuote voi olla lämmennyt. [32]

5.2.4. Repijämyllyt ja veitsimyllyt

Repijämyllyt muistuttavat vasaramyllyjä. Repijöiden veitset voivat olla kiinteitä tai nivelöityjä. Kappale katkeaa, kun veitset liikkuvat vastalevyjen urissa. Myllyssä voi olla myös tosiaan vastaan pyörivät veitsiakselit. Repijämyllyä käytetään erilaisten jätteiden, kuten muovipussien, kankaan, jätepaperin, kumijätteen, ja puun hajottamiseen.

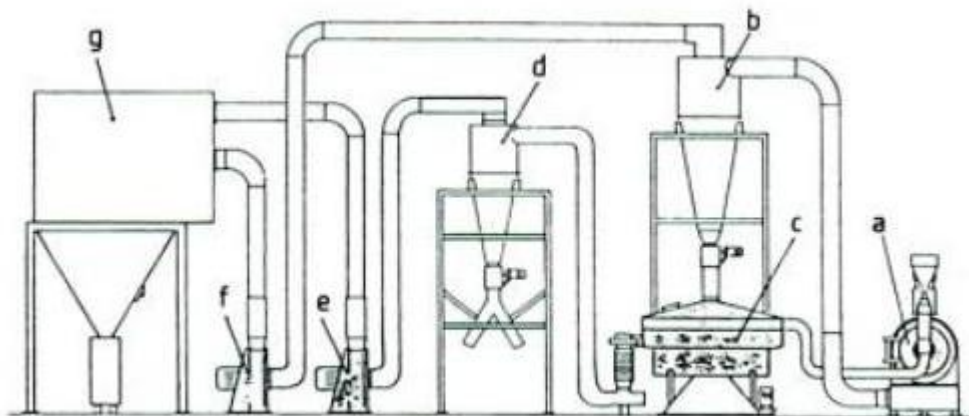


Kuva 5.2. Esimerkki veitsimyllystä. [50]

Veitsimyllyssä veitset ovat vaakatasossa ja katkovat kappaleen vastakappaleita vasten (kuva 5.2.). Veitsimyllyä voidaan käyttää muoviputkien murskauksessa erityisellä putkien murskaukseen tarkoitetulla laitteistolla. [32, 50]

5.2.5. Jauhatusmyllyt

Monia muovijätteitä, jotka sisältävät edelleen epäpuhtauksia, voidaan työstää uudelleen niiden ollessa jauhemaisessa muodossa. Tällöin epäpuhtaudet toimivat täyteaineina materiaalissa. Jauhatusmyllyjä ovat esimerkiksi yleisvalssimylly, hienoksi jauhava veitsimylly, myllynsiipierotin, rengasvalssimylly ja hammastettu kiekkomylly. [32] Kuvassa 5.3. nähdään muovien jauhatuksen yleiset operaatiot: jauhatus, syklonierottelu, seulonta, hienoaineksen erottelu sekä pölynsuodatusyksikkö.



Kuva 5.3. Muovien jauhatussysteemi, jossa osat ovat a) yleisvalssimylly, b) syklonierotin ohjauspyöräsulkimella, c) karkean materiaalin palauttava seulakone, d) hienoaineksen erottelija yhdistettynä säkitykseen, e) kuljetinsiipi hienoainekselle, f) kuljetinsiipi jauhettavalle materiaalille ja g) itsepuhdistuva pölynsuodatin. [32]

Yleisvalssimylly on suuren nopeuden mylly, jonka vastinlevyjä voidaan vaihtaa väliaikaisesti vaihdettaessa jauhettavaa materiaalia. Laite on edullinen ja monipuolinen. Hienoksi jauhavassa veitsimyllyssä on huomattavasti enemmän veitsiä kuin veitsimyllyssä ja erotteluväli pienempi. Veitsimyllyn huono puoli on vaihdettavien veitsien suuri määrä ja hyvä puoli on vähäinen lämmöntuotto. [32]

5.3. Erottelu

Hyvälaatuisen uusiomateriaalin valmistus edellyttää, että jättemateriaali lajitellaan omiin jättejakeisiinsa ja että syöte olisi tasalaatuista. Erottelun tarkoituksena voi olla epäpuhtauksien poistaminen materiaalista tai muoviseoksen jakaminen pienempiin jakeisiin. Erottelulaitteisto toimii parhaiten, kun hiukkaskoko on tasainen, minkä vuoksi ennen erottelua on hyvä murskata ja seuloa seos.

Muovien erotteluun käytettyjä ominaisuuksia ovat tiheyteen perustuva erottelu, kastuvuus, magneettisuus, sähköiset ominaisuudet, kemialliset ominaisuudet ja optiset ominaisuudet. Erotusmenetelmissä oletetaan, että erotettavat komponentit poikkeavat toisistaan ainakin yhdessä fysikaaliskemiallisessa ominaisuudessa. [32]

5.4. Tiheyteen perustuva erottelu

Muovien tiheyteen perustuvia erotusmenetelmiä ovat kellumis-uppoamis-erottelu, hydrosyklonierottelu ja ilmaseulonta. Pääsääntöisesti kuivaerotusmenetelmissä edellytetään selkeää eroa tiheyksissä ja kapeaa hiukkaskokojakaumaa. Märkämenetelmissä tiheysero voi olla pieni, noin $0,02 \text{ g/cm}^3$, eikä menetelmä ole niin herkkä rakeen muodon ja koon muutoksille. [32]

Taulukko 5.1. Muutamien muovien tiheyksiä. [27, 32]

Muovi	Lyhenne	Tiheys (g/cm^3)
Matalatiheyksinen polyeteeni	PE-LD	0,91...0,94
Korkeatiheyksinen polyeteeni	HD-PE	0,94...0,98
Polypropeeni	PP	0,905...0,91
Polyamidi	PA	1,02...1,21
Polyteenitereftalaatti	PET	1,37
Pehmitetty PVC	PVC-P	1,1...1,4
Kova PVC	PVC-U	1,39
Kloorattu PVC (64% Cl)	PVC-C	1,55

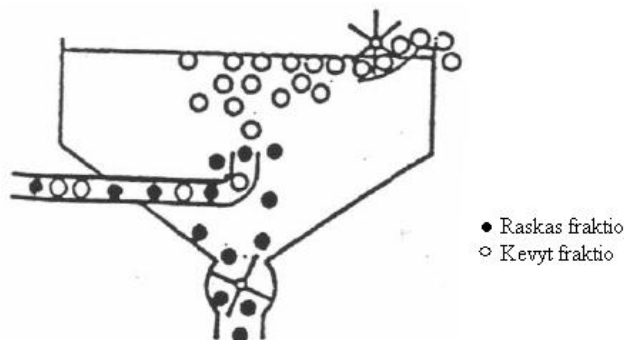
Yleisimpien muovien tiheydet vaihtelevat $0,9...1,55 \text{ g/cm}^3$ (taulukko 5.1.). Muovien lujitteena käytettyjen lasi- ja hiilikuitujen tiheydet vaihtelevat $1,5...3,0 \text{ g/cm}^3$. [27] Muoveilla tiheyksien kirjallisuusarvot ovat kuitenkin suuntaa-antavia, koska todellisuudessa tiheys vaihtelee valmistajien mukaan. Lisäksi käytetyt lisäaineet vaikuttavat olennaisesti tiheyteen. [32]

5.4.1. Kellumis-uppoamis-erottelu

Kellumis-uppoamis-erottelussa hiukkaset, joilla on pienempi tiheys jäävät kellumaan erotusnesteen pintaan ja suuremman tiheyden hiukkaset uppoavat (kuva 5.4.). Erotusnesteenä voidaan käyttää yksinkertaisimmillaan vettä, jolloin erotuspiste on $1,0 \text{ g/cm}^3$. Mikäli erotusnesteen tiheyttä halutaan pienentää, liuotetaan nesteeseen

alkoholeja. Mikäli tiheyttä halutaan kasvattaa, liotetaan erotusnesteeseen erilaisia suoloja. [32]

Menetelmällä saadaan eroteltua jaokset hyvin toisistaan. Käytettäessä vettä erotusnesteinä menetelmällä voidaan erotella polyolefiinit 98-prosenttisesti. Loput 2 % epäpuhtauksista on hienojakoista ainesta PVC- tai PS -muoveista, joka tarttuu PE/PP -partikkeleihin tai kulkeutuu turbulenssin mukana. Menetelmällä ei pystytä erottamaan 20...30 µm pienempiä partikkeleita. [32]



Kuva 5.4. Kellumis-uppoamis -erottelu. [50]

Erottelumenetelmän hyviä puolia on, että hiukkaskokojakauma ei ole kovin herkkä, pieni ero tiheyksissä riittää ($0,02 \text{ g/cm}^3$) ja menetelmä sopii suurille materiaalmäärille. Huonoja puolia on, että jätevedet tulee käsitellä ja hyödynnettävä jaos on kuivatettava. PVC:tä eroteltaessa uppoava PVC-jae jatkokäsitellään ja uppoamaton jae on hyödynnettävä muulla tavoin. [32]

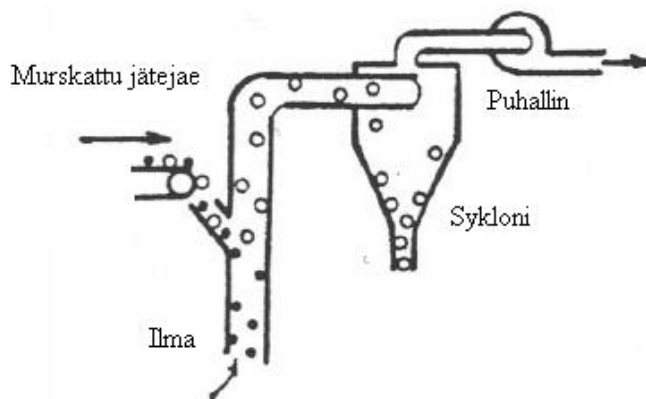
5.4.2. Hydrosyklonierottelu

Hydrosyklonierottelussa paineenalainen erotusneste, jossa muovipartikkelit ovat mukana, ohjataan laitteen geometrian mukaiseen pyörimisliikkeeseen. Keskipakovoiman ja painovoiman vaikutuksesta erotusnestettä raskaammat partikkelit ohjautuvat alaspäin pyörteen ulkoreunalle ja kevyemmät partikkelit liikkuvat puolestaan kohti syklonin keskellä olevaa ilmatilaa. Erotusnestettä kierrätetään prosessissa muovijätteen puhtaudesta riippuen.

Hydrosyklonierottelulla on saatu hyviä tuloksia. Käytettäessä vettä erotusnesteinä PS/PVC -seoksesta on saatu eroteltua PVC:tä jopa 99,5 p- %. Hydrosyklonien etuja on, että ne ovat monikäyttöisiä, edullisia, vievät vähän tilaa ja niiden käsittelykapasiteetti on kohtalaisen suuri. [32]

5.4.3. Ilmaseulonta

Ilmaseulonta on kuivaerotusmenetelmä, joka edellyttää eroteltavilta materiaaleilta selkeää tiheyseroa. Jakeiden erotus toisistaan tehdään imu- ja puhallusoperaatioilla. Kuvassa 5.5. on esitetty vertikaalisen ilmaerottelun toimintaperiaate.

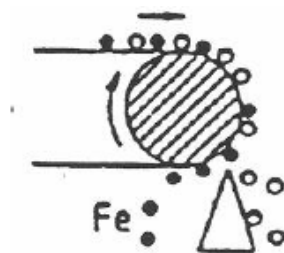


Kuva 5.5. Vertikaalinen ilmaerottelu. [50]

Esimerkkinä ilmaseulonnasta PVC:n ja kuparin erottelu kaapeleiden kierrätyksessä. Ilmaseulonta on halpa ja yksinkertainen erottelumenetelmä, mutta seulontatuloksessa voi olla virheitä. [32]

5.5. Elektrostaattinen erottelu

Sähköstaattinen erottelu perustuu muovien kykyyn varautua sähköisesti. Elektrostaattisessa erottelussa eroteltavat muovit varataan ja ohjataan eri elektrodeille, jolloin ne jakautuvat erimerkkisille elektrodeille varauksensa ja muovilajinsa perusteella. Jos erotusparametrina käytetään materiaalien erilaista sähkönjohtavuuskykyä, käytetään rullaerotinta, ja jos erotusparametrina ovat triboelektriset ominaisuudet, niin käytetään pudotusliike-erotinta. [32] Kuvassa 5.6. nähdään vapaapudotusliike-erottelun periaate.



Kuva 5.6. Kuljetustelan päähän kytketty magneettierotin. [50]

Varautumisen selektiivisyys riippuu hyvin pitkälti eroteltavan muovin pinnasta, vallitsevista olosuhteista ja käsittelyaineista. Vapaapudotusliike-erottelun hyviä puolia on, ettei erottelukyky riipu tiheydestä, raekoosta (<10 mm), käsittelykapasiteetti on suuri, menetelmä on kuivamenetelmä ja energiankulutus alhainen. [32]

5.6. Liukoisuuteen perustuva erottelu

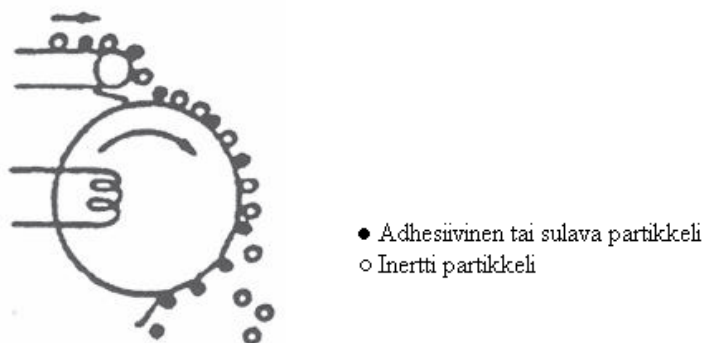
Liukoisuuteen perustuvassa erottelussa pätee useimmiten kemiasta tuttu perinteinen sääntö ”sama liuottaa samaa”. Muovien erottelussa liukoisuusparametrien vertailu ei kuitenkaan ole välttämätöntä. Muovien liukenemiseen vaikuttavat liuottimen luonne ja

makromolekyylinen rakenne. Mikäli makromolekyylinen rakenne on samankaltainen molemmissa, muoviin voi absorboitua liuotinta ja muovi turpoaa. Liuottimen absorboituminen polymeeriin riippuu lisäksi polymeerin ja liuottimen luonteesta, atomien välisistä sekundäärisistä sidosvoimista ja lämpötilasta.

Liukoisuuteen perustuvassa erottelussa on useita huonoja puolia. Liuottimet ovat myrkyllisiä ja kalliita, joitakin liuottimia voidaan käyttää ainoastaan räjähdys-suojatussa tilassa ja liuottimien haihduttaminen pois materiaalista on kallista. Hyvä puoli on, ettei materiaalille tapahdu termistä hajoamista. [32]

5.7. Lämpöerottelu

Lämpöerottelu perustuu muovien sulamiseen ja kykyyn kiinnittyä termisesti lämmitetyn materiaalin pintaan. Käytännössä partikkelit tarttuvat termisen adheesion seurauksena lämmitetyn kuljetintelan tai -rullan pintaan. Kuljetintelan päässä pienemmän termisen adheesion omaavat partikkelit irtoavat pinnasta ja putoavat suoraan alapuolella olevaan keräysastiaan. Sulavat tai suuremman termisen adheesion omaavat partikkelit irtoavat painovoiman vaikutuksesta vasta hetkeä myöhemmin (kuva 5.7.). [32]



Kuva 5.7. Termiseen adheesioon perustuva erottelu. [50]

Menetelmää voidaan käyttää erottamaan polyolefiinimuovijaos ja pullojaos eri muovilajeihin, kuten erottamaan PVC- ja PET -muovipullojakeet toisistaan. Termiseen adheesioon perustuva menetelmä ei kuitenkaan ole erityisen kehittynyt menetelmä, vaikka se on osoitettu toimivaksi erottelumenetelmäksi. [32]

5.8. Manuaalinen ja automaattinen erottelu

Lajittelu voidaan tehdä manuaalisesti tai automaattisesti. Manuaalinen erottelu tehdään yksinkertaisesti aistihavaintojen perusteella. Käsien tehtävässä erottelussa sekalainen jättemateriaali jaotellaan kuljettimelta joko eri kuljetinlinjoille tai varastoitavaksi. Menetelmä sopii käytettäväksi silloin, kun lajiteltavat kappaleet ovat tarpeeksi suuria. Korkeat työvoimakustannukset rajoittavat kuitenkin käyttöä. [32]

Automaattilajittelu soveltuu erityisesti pienikokoiselle jätteelle ja suurille jätemääriksi. Automatisoidun lajittelijan lajitteluteho (1-2 tonnia tunnissa) on huomattavasti suurempi kuin käsien lajiteltaessa (80 kg tunnissa). [41]

Yleisimmin likaisten muovien lajittelussa käytetään Near Infrared Spectroscopy (NIR) -teknologiaa. NIR-teknologia perustuu infrapunatunnistukseen, jolloin jätteestä voidaan tunnistaa eri muovilaadut ja ei-muoviset materiaalit. Lajitteluperusteena voidaan käyttää myös muovien eri värejä. Materiaalin havaitsemisen jälkeen jäteobjekti siirretään erilleen muusta jätteestä tietokoneohjatusti ilmapuhalluksella. [41] NIR-teknologiaa voidaan käyttää kirkkaiden PVC-tuotteiden, kuten pullojen, erottamiseen muusta jätteestä, mutta se ei välttämättä sovi tummalle PVC-jätteelle. Tumman PVC-jätteen erottamiseen voidaan käyttää röntgenfluoresenssiin (XRF) perustuvaa lajittelua, jolloin havaitseminen perustuu PVC:n kemialliseen koostumukseen. [51]

6. HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET

Luvussa 4 tarkasteltiin esimerkkejä pehmitetyn PVC-jätteen kierrätyksestä mekaanisin menetelmin ja raaka-ainekierrätyksessä. Tässä kappaleessa tarkastellaan tarkemmin seuraavia hyödyntämisvaihtoehtoja:

- perinteinen mekaaninen kierrätys (jauhatus),
- perinteinen mekaaninen kierrätys (granulointi),
- integroitu Vinyloop -prosessi ja
- raaka-ainekierrätys.

Tässä luvussa on kuvattu prosessit pääpiirteittäin, pohdittu kunkin menetelmän soveltuvuutta jonkin olemassa olevaan jätteenkäsittelylaitokseen sekä esitetty käsittelymenetelmien hyviä ja huonoja puolia. Tässä luvussa keskitytään menetelmien tekniseen soveltuvuuteen ja luvussa 7 arvioidaan menetelmien kustannuksia.

Tarkasteluun valittiin useita menetelmiä, jotta eri vaihtoehtojen vaatimukset ja tuotokset tulisivat monipuolisesti esille Suomen jätemäärillä. Perinteisistä mekaanisista kierrätysmenetelmistä esitellään kaksi vaihtoehtoa, koska ne pohjautuvat eri tekniikoihin. Vinyloop -prosessi puolestaan edustaa kehittyneempää mekaanista kierrätystä. Raaka-ainekierrätys valittiin vertaamalla eri raaka-ainekierrätysmenetelmiä, joista Dow/BSL -menetelmällä arvioitiin olevan useita hyviä puolia.

6.1. Jätteen keräys

Jätteen keräyksen tavoitteena on suuri keräyssaanto. Suuren keräyssaannon saamista edesauttaa jätteen tunnistaminen sen syntypaikalla, jätelavojen sijoittaminen syntypaikoille ja vajaiden jäteastioiden tyhjennyksen välttäminen keräyksessä. PVC-jätteen keräystä voivat vaikeuttaa jätteen tunnistaminen muusta muovijätteestä, jätteen hajanaisuus ja pitkät kuljetusetäisyydet. [9]

Keräystehokkuuden kannalta jätteen syntypaikan tulisi olla kohtalaisella etäisyydellä käsittelylaitoksesta ja syntypaikalta saatava keräyssaanto suuri. Suurin mekaaniseen kierrätykseen soveltuva keräyssaanto voitaisiin saada keräämällä rakennusjäte-, kaapelijäte, autoromutuksen kevytjäte, venesuojat sekä pre-consumer -tuotantojäte. Hyviä yksittäisiä keräyskohteita ovat korjausrakentamisen isot asuinkerrostalot ja toimitilat sekä kaatopaikalle toimitettava tuotantojäte. [9] Ison kerrostalon purkamisesta voisi arvioida syntyvän arviolta 5...10 tonnia jätettä, mikäli jätettä oletetaan syntyvän sekä PVC-lattiamatoista että kertakäyttöisistä PVC-rakennuspeitteistä (liite 3). Rakennusjätteen keräys tapahtuu tällä hetkellä purkuraakoitsijoiden toimesta. [4]

Taulukko 6.1. Arviot hyödynnettävistä jätemääristä.

PVC	Alue	Jättemäärä (t/v)
Pehmitetty PVC	Etelä-Suomi	3000...4000
Pehmitetty PVC	Etelä-Suomi + muu Suomi (50 %)	4500...6000
Pehmitetty PVC + kova (50 %)	Koko Suomi	6200...7900
Pehmitetty PVC + yhdysk.jätettä 15-25%	Koko Suomi	8000...10 000

Taulukkoon 6.1. on koottu arviot saatavissa olevista jätemääristä. Luvun 3.4.2. laskelman perusteella oletetaan, että mekaaniseen kierrätykseen saatavissa oleva pehmitetyn PVC-jätteen määrä on 3000...4000 t/v Etelä-Suomen alueelta.

Mikäli muualta Suomesta kerättävän pehmitetyn jätteen määrä olisi puolet Etelä-Suomen määrästä, yhteissaanto voisi olla arviolta 4500...6000 t/v. Kierrätysmenetelmään, johon myös kova post-consumer PVC-muovijäte soveltuisi syötteenä, voisi olla mahdollista saada jätettä enemmän. Mikäli oletetaan, että rakennusjättemäärästä 8300...9300 t/v (taulukko 2.3.) vähennetään arvioitu pehmitetyn jätteen määrä (4500...6000 t/v), olisi jätettä saatavissa vielä 3300...3800 t/v. Kun taas tästä esimerkiksi puolet olisi kierrätyskelpoista PVC-muovijätettä, hyödynnettävissä oleva jättemäärä olisi 6200...7900 t/v.

Jos tähän jättemäärään arvioitaisiin lisäksi saatavaksi yhdyskuntajätteen sisältämästä PVC:stä 15–25 % (taulukon 2.3. mukaan 14 700...18 500 t/v), voisi kokonaisjättemäärä nousta arviolta 8000...10 000 t/v.

6.2. Jätteen lajittelu

Lajittelu voidaan tehdä joko jätteen syntypaikalla tai käsittelylaitoksella. Syntypaikkalajittelussa taustalla ovat kuitenkin yleensä velvoittaminen lajitteluun ja ympäristöstä huolehtiminen. Keräyksen jälkeisellä lajittelulla pyritään minimoimaan kustannukset ja saavuttamaan vähimmäisvaatimukset ennen seuraavaa käsittelyvaihetta. Post-consumer -jätteen mekaaninen kierrätys edellyttää yleensä aina esilajittelun ennen varsinaista käsittelyä. [41]

Manuaalinen lajittelussa lajittelutarkkuus on hyvä, mutta se on hidasta ja kallista. Automaattinen NIR- tai XRF -lajittelijat ovat tehokkaita etenkin pienikokoisille jätteille, kuten pulloille, mutta isokokoisten jätteiden lajittelussa käsinlajittelu on varteenotettava vaihtoehto. Automatisoidun lajittelijan hankinnassa on syytä huomioida:

- lajitteluvirheet (epäpuhtausaste lajittelun jälkeen 5-10 %),
- jäte ei saa sisältää paperia, lasia tai metalleja,
- käyttökapasiteetti tulee olla korkea kustannusten kattamiseksi ja
- ylläpito edellyttää tietokone- ja elektroniikkaosaamista. [41]



Kuva 6.1. Kahmari toimii apuna isokokoisten jätteiden käsinlajittelussa. [37]

Vaikka korkeat työvoimakustannukset houkuttelevat käyttämään automatisoitua lajittelijaa, mekaaninen kierrätys vaatii usein vähintään yhden henkilön lajittelemaan ja valvomaan prosessia. [37] Jätteen vastaanoton jälkeen jäte voitaisiin lajitella välivarastoitavaksi jättejakeittain. Syötettäessä materiaalia prosessiin manuaalisesti lajittelija poistaisi selkeästi prosessiin kuulumattoman aineksen ja valvoisi samalla kuljettimelle menevää materiaalivirtaa (kuva 6.1.).

6.3. Mekaaninen kierrätys (murskaus/jauhatus)

Perinteisellä mekaanisella kierrätyksellä valmistettaisiin lopputuotteena joko korkealaatuista uusiomateriaalia tai heikompileatuista rouhetta. Lähtökohtana olisi lattiamattojen kierrätysprosessi (AgPR).

Valmistettaessa korkealaatuista uusiomateriaalia yhdestä PVC-jättejakeesta eurooppalaisten mekaanisten kierrätyslaitosten tapaan syötteen ja saatavan tuotteen määrä jäisi vähäiseksi. Sen sijaan keräämällä kaikki mekaanisesti kierrätettävissä oleva pehmitetty PVC-jäte Suomessa voisi olla mahdollista saavuttaa laitoksen minimikapasiteetti 5000 t/v (taulukko 6.1.). Tällöin syöte olisi heterogeenistä ja lopputuotteen lisä- ja täyteainekoostumus olisi hyvin vaihteleva.

6.3.1. Syötemateriaali ja kapasiteetti

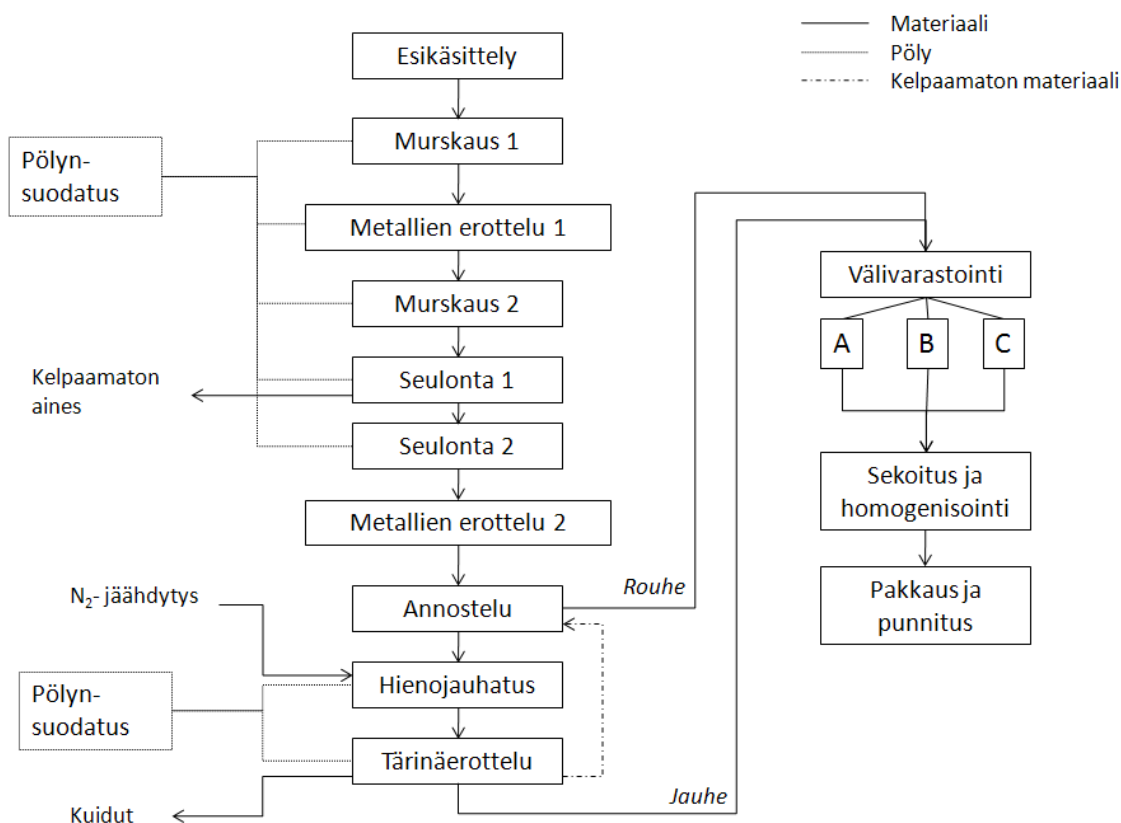
Perinteisen mekaanisen kierrätyksen syötteenä olisivat PVC:tä sisältävät lattiamatot, PVC-suojapeitteet sekä muu PVC-pinnoitettu kangasjäte, kuten PVC -mainoslakanat ja erilaiset markiisikankaat. Prosessin syöttävät jättejakeet voitaisiin jakaa esimerkiksi kolmeen päätyyppiin: suojapeitteet (A), lattiamatot (B) ja muu jäte (C). Syötteen määrä olisi 3000...4000 t/v ja prosessiin ajettaisiin kerrallaan yhtä jätejakeetta.

AgPR:n mukaan lattiamatot eivät saisi sisältää tekstiilipäälysteitä, pahvia, puuta, korkkia, juuttia, linoleumia, kumia tai asbestiä. Vaikka tekstiilipäälysteet eivät soveltuisi syötteeksi, menetelmällä on kuitenkin mahdollista irrottaa ainakin lattiamattojen sisältämä polyesterikuitu hienojauhatuksella. [37]

6.3.2. Prosessi

Komposiittimateriaalien esimurskaukseen voidaan käyttää periaatteessa hyvin samantyyppisiä murskaimia kuin puhtaan muovijätteen rouhimisessa. Komposiittimateriaaleilla yleensä käytettyjä murskaimia ovat yksi- tai monikiulu leikkuuvalssit sekä hydrauliset murskaimet ja leikkurit. [32] Erityisesti lujitemuovijätteen murskauksessa on saatu hyviä tuloksia murskattaessa yksiroottorisella, hitaasti tai keskinopeudella pyörivällä leikkaavalla terällä, jossa mäntä työntää jätteen roottoreita päin. [52]

Prosessivaiheet etenevät kaaviokuvan 6.2. mukaisesti. Esikäsittelyssä lajitellaan jäte ja poistetaan suurimmat metallipalat. Ensimmäisen murskauksen (karkea murskaus) jälkeen palakoko on alle 3 cm. Toisen murskausvaiheen (vasaramurskaus) jälkeen palakoko on alle 10 mm. Murskausvaiheiden välissä metalli erotellaan magneettisella erottimella. Vasaramurskauksessa materiaalia jauhetaan pienemmäksi rummun seinää vasten, jolloin pehmitetystä PVC:stä irtoaa hienojakoinen sementti ja liima. Kelpaamaton aines erotellaan seulalla ja ohjataan omaan keräysastiaan. Valitettavasti on, ettei tiedetä varmaksi, miten vasaramyllyllä saadaan rikottua ohuet PVC-pressut tai pinnoitetut tekstiilikankaat. Jauhatuksessa syntyvä hienojakoinen pöly ohjataan pölyn-suodatukseen.



Kuva 6.2. Mekaanisen kierrätyksen (murskaus) eteneminen.

Mikäli lopputuotteena halutaan valmistaa rouhetta (esimerkiksi palakokoon 5-10 mm), jää loppuosa prosessista pois ja rouhe ohjattaisiin annostelusta välivarastoon. Rouhe sisältäisi edelleen ainakin kuitua, pölyä ja epäpuhtauksia, mutta ei metallia.

Tasalaatuisemman rouhesekoitteen valmistamiseksi annostelusiiloista voitaisiin annostella aina tietty määrä kutakin ajettua jätettä. Hienojakoisen jauheen valmistamiseksi prosessivaiheet jatkuisivat seuraavasti: annostelu, kryogeeninen jäähdytys, hienojauhatusta, värinäerottelu, välivarastointi, välivarastointi, sekoitus ja säkitys. Hienojauhatuksella saatavia etuna on, että hienojakoinen lopputuote on käytettävissä monipuolisemmin uusiokäyttökohteissa ja siihen voidaan sekoittaa lisäaineita tuotteen valmistuksessa. Lisäksi hienojakoisen lopputuotteen homogeenisyys ja laatu ovat paremmin kontrolloitavissa.

Jauhatuksessa on käytettävä jäähdytystä, sillä jauhatuslämpötilan nousu yli 80 °C asteen voi edesauttaa pehmitinaineiden haihtumista. Jäähdyttämällä rouhe hetkellisesti nestemäisen tyyppien avulla tehdään jauhatuksesta helpompaa. Jäähdytyksen jälkeen virtausnopeutta lasketaan ja annostellaan tasainen materiaalivirta hienojauhatukseen. [37]

Menetelmän modifiointi usealle jättejakeelle on kuitenkin kyseenalaista. Syötteen heterogeenisyyden vuoksi lopputuote ei välttämättä ole tasalaatuista ja se saattaisi sisältää edelleen muun muassa kuitua. Usean jätelajin murskaamisen kannalta voisi olla hyvä, mikäli ainakin pyörimisnopeus ja murskauskarkeus olisivat hydraulisesti säädettävissä. Jälkimurskauksessa voitaisiin käyttää vasaramyllyn sijaan myös muuta pyörivää silppuria.

Jotta hienojakoisen materiaalin jauhatusta ei laskisi käsittelykapasiteettia (taulukko 6.2.), tulisi hienojauhatuslaitteiston määrä kaksinkertaistaa. AgPR:llä prosessia ajetaan yhdessä vuorossa, käsittelykapasiteetti on 1-2 t/h ja käsiteltävä määrä 1700 t/v. [37] Mikäli jätettä käsiteltäisiin 3000...4000 t/v vastaavalla käsittelykapasiteetilla, edellytettäisiin ajoa kahdessa vuorossa.

Taulukko 6.2. Arviot käsittelykapasiteeteista. [37]

Murskaustoiminto	Toiminta-aste
Esimurskaus	> 5 t/h
Vasaramurskaus	2 t/h
Hienojauhatusta	1 t/h

Muovijätteen mekaanisessa kierrätyksessä kokonaisenergian kulutuksen on arvioitu olevan tyypillisesti 2,78–4,17 MWh/t riippuen prosessin yksittäisistä vaiheista ja niiden energiantarpeesta. Hyvälaatuisen kierrätys-PVC:n käsittelyyn kuluu sähköenergiaa arviolta 4,17 MWh/t ja heikompilaatuisen uusiomateriaalin 2,78 MWh/t. [2]

6.3.3. Lopputuotteet

Hienojakoinen lopputuote koostuisi pääsääntöisesti kolmesta jättejakeesta erotellusta pehmitetystä PVC:stä. Saatavan tuotteen määrä riippuu syötteen laadusta ja määrästä sekä hyödyntämisaistesta. Mikäli prosessin hyötykäyttöaste olisi 70–80 %, uusiomateriaalia tuotettaisiin 2000...3000 t/v.

Lopputuotteen raekokoa voitaisiin muunnella hienojauhatuksella esimerkiksi 400–800 µm, mutta lopputuotteen väriä ei pystyittäisi takaamaan. Jätemuovin lopputuotteen väri on usein ruskea, harmaa tai kirjava. Koska jauheen lisä- ja täyteainekoostumus olisi hyvin monimuotoinen uusiotuotteen valmistus edellyttäisi lisäaineiden käyttöä. [32]

Rouheesta voitaisiin taata rouhe koko ja puhtaus metalleista. Rouheelle tulisi löytää käyttökohde sellaisenaan tai se voitaisiin jatkojalostaa kolmannen osapuolen toimesta joko Suomessa tai ulkomailla. Karkean rouheen valmistus voisi olla riittävä käsittelymenetelmä siinä tapauksessa, että jätemuoviin erikoistunut jatkojalostaja olisi valmis maksamaan murskeesta jonkinlaisen hinnan. Pelkän rouheen valmistus Suomen markkinoille edellyttäisi käyttökohteiden ja ostajien löytämistä. Rouhetta voitaisiin käyttää esimerkiksi ratsastus- ja palloilukenttien pohjamateriaalina, raviradoilla tai melusuojen täyteaineena.

Muut lopputuotteet ovat prosessi-, metalli- ja kuitujäte. AgPR:llä kaatopaikalle päätyvää prosessijätettä syntyy 10–20 %, ja se sisältää muun muassa likaa, liimaa, betonimursia ja muita muoveja. [37] Metallijäte on kierrätettävissä, lopputuotteeksi kelpaamaton prosessijäte voitaisiin mahdollisesti hyödyntää energiana ja kuitujakeen materiaalihyödyntäminen olisi ensisijainen vaihtoehto polton sijaan.

6.3.4. Muut tekijät

Menetelmä edellyttäisi prosessiin soveltuvan jätteen tunnistamista, mikä puolestaan edellyttäisi henkilöstön koulutusta. Kuitupitoinen jäte kuluttaa murskainten teriä, minkä vuoksi niiden tulisi olla nopeasti ja helposti vaihdettavia [32]. Hienojauhatusta on prosessin herkin ja kallein vaihe. [37] Muiden kuin polyesterikuitujen erottaminen samanaikaisesti hienojauhatuksella on kyseenalaista, kuten prosessin vaihteluiden kesto ylittää.

Hyviä puolia menetelmässä on, nestetyyppijäähdytyksessä voitaisiin käyttää mahdollisesti käsittelylaitoksessa jo olemassa olevaa typetysjärjestelmää. Menetelmä ei myöskään edellytä muovien prosessointia eikä lisäaineistusta, vaan ne jäisivät jatkojalostajan tehtäväksi. Prosessia olisi mahdollisuus ajaa panostyypisesti (jos jätemäärä jää pieneksi) eikä kierrätys edellyttäisi muovijätteen pesu- ja kuivausvaiheita.

6.4. Mekaaninen kierrätys (granulointi)

Granulointi on perinteisesti kestopuovien kierrätyksessä käytetty menetelmä. Menetelmässä hyödynnetään kestopuovien uudelleentyöstön mahdollisuutta. [27]

Granulointimenetelmän etuna on, että lopputuotteeseen voidaan lisätä lisäaineita, jolloin laajennetaan käyttökohteiden määrää ja myyntipotentiaalia eikä menetelmä edellytä erityistä hienojauhatusprosessia kuituaineksen erottelemiseksi. Granulointikierrätyksen heikkouksia ovat epävarma soveltuvuus pehmitetylle PVC:lle, kuitujen irtoaminen matriisista, pesu- ja kuivausprosessien ylläpito, rajoitettu ekstruusiokapasiteetti sekä soveltuvuus käsittelylaitoksen toimintaympäristöön.

6.4.1. Syötemateriaali ja kapasiteetti

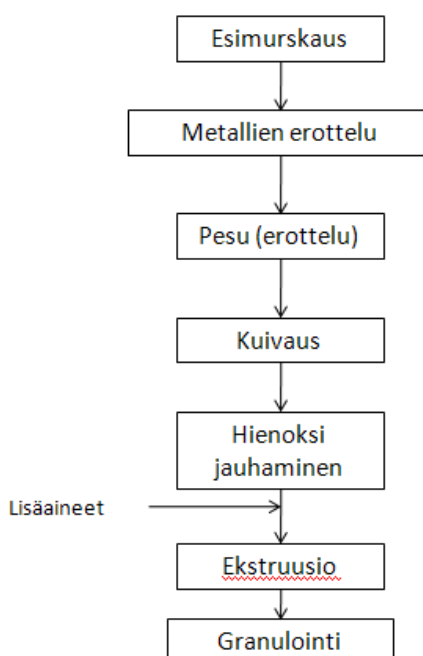
Syötemateriaali ja -määrä olisivat karkeasti arvioituna samat kuin edellisessä menetelmässä. Prosessiin syötettäisiin yhtä jätejätettä (lattiamatto, peitteet jne.) kerrallaan.

6.4.2. Prosessi

Prosessivaiheet ovat esimurskaus, metallien erottelu, pesu, kuivaus, hienojauhatus, nauhan valmistus ekstruusiolla ja nauhan granulointi (kuva 6.3.). Syötteen tulisi olla hyvin lajiteltu ennen esimurskausta.

Ensimmäisessä vaiheessa muovijätteestä erotettaisiin esimerkiksi vapaapudotus -erottelulla metallit (palakoko < 10 mm). Tämän jälkeen märkäsiiloon kuljetettu muovijäte jauhettaisiin märkäjauhatusmyllyllä ja eroteltaisiin ylimääräinen aines märkäseulalla.

Upotus-kellutus -erottelussa tulisi saada PVC-kompaundi, heterogeenisen jätteen erityyppiset kuidut sekä muu jae erilleen toisistaan, mikä voi osoittautua ongelmalliseksi. Pehmitetyn PVC:n tiheys ($1,1\text{--}1,4\text{ g/cm}^3$) on hyvin lähellä polyesterikuidun tiheyttä ($1,22\text{--}1,36\text{ g/cm}^3$), ja materiaaleja voi olla mahdotonta saada erilleen toisistaan voimakkaan kuitu-matriisi -adheesion ja samankaltaisten tiheyksien takia. Syötteen sisältämät raskaammat kuidut (lasikuitu) sekä sementti- ja metallijäämät laskeutuisivat altaan pohjalle.



Kuva 6.3. Mekaanisen kierrätyksen (granulointi) vaiheet.

Erottelussa voitaisiin käyttää joko hydrosykloni- tai sentrifugierottelua tai molempia. Hydrosykloni-erottelulla saataisiin eroteltua alustavasti hienojaetta erilleen

märästä PVC-jakeesta kohtalaisen suurella kapasiteetilla. Tämän jälkeen sentrifugiseulakuljettimella saatettaisiin märkä PVC-jae uudelleen pyörimisliikkeeseen, jolloin painavammat partikkelit (PVC) pyrkisivät siirtymään mahdollisimman etäälle pyörimisakselista ja saataisiin täten talteen.

Mekaanisessa kuivauksessa voidaan käyttää liikkuvia seuloja, fluidityyppisiä seuloja, sentrifugiseuloja tai portaittaisia seuloja [32]. Erottelumenetelmissä käytetty vesi kierrätettäisiin ja metallijae hyödynnettäisiin materiaalina.

Kuivattu PVC-kompaundi kannattaisi jauhaa pienempään raekokoon homogeenisuuden lisäämiseksi ennen ekstruusiota. Lisäaineilla voidaan tasata lopputuotteen lisäainepitoisuuksia (muun muassa pehmitin- ja stabilointiaineet) ja parantaa prosessoitavuutta. Ekstruusiolla valmistettu nauha ohjattaisiin välittömästi jäähdytysaltaan kautta granulaattoriin.

Teknisesti granulointiprosessia rajoittavia tekijöitä voivat olla ekstruusioteho ja jäähdytykseen kuluva aika ennen granulointia. Suuremman kapasiteetin käsittelylaitos edellyttäisi useamman ekstruusiolinjan käyttöä. [32]

6.4.3. Lopputuotteet

Tuotettavan lopputuotteen määrä olisi mahdollisesti samaa luokkaa kuin jauhatusmenetelmällä. Lopputuotteesta voitaisiin taata granulaattikoko, puhtausaste ja lisäaineilla saatavat ominaisuudet. Lopputuote saattaisi sisältää pieniä määriä kuitua, mutta ei metallia. Koska lopputuote on lisäaineistettu, uusiomuoviraaka-aineelle voisi löytyä ostaja Suomesta. Sopivia käyttökohteita uusiomuoville voisivat olla teollisuushallien lattiamatot, kitkapinnat yleisesti, äänieristelevyt tai puutarhatuotteet.

Muista lopputuotteista metalli voitaisiin kierrättää materiaalina ja märkä kuitupitoinen jätejake mahdollisesti hyödyntää energiana. Jätevedet kierrätettäisiin vedenpuhdistusprosessissa.

6.4.4. Muut tekijät

Vaikka lisäaineiden avulla olisi mahdollista parantaa uusiomateriaalin ominaisuuksia, jokaisen ekstruusiokerran on arvioitu vähentävän 20 %:lla materiaalin käyttöikä ja prosessointikertoja. [32]

Menetelmän käytön etuja olisivat olemassa olevan jätteenkäsittelylaitoksesta saatavissa oleva energia ja höyry kuivatukseen, jätevesien käsittely ja jätefraktion hyödyntämismahdollisuus energiaksi. Prosessin keskeinen epävarmuustekijä on erottelun onnistuminen.

6.5. Integroitu Vinyloop-prosessi

Vinyloop -prosessin integrointi Suomessa jonkin jätteenkäsittelylaitoksen yhteyteen olisi kokonaisvaltainen materiaali-kierrätysvaihtoehto, koska kuitupitoisen pehmitetyn PVC-jätteen lisäksi samalla saataisiin kierrätettyä myös kovaa PVC:tä. Solvayn

patentoimat Vinyloop- ja Taxyloop -käsittelymenetelmät ovat nykyaikaisia mekaanisia kierrätysmenetelmiä ja keskeisessä roolissa PVC-jätteen kierrätyksessä Euroopassa. Muilla mekaanisilla kierrätysmenetelmillä ei ole onnistuttu avaamaan lujaa kuitumatriisi -sidosta vastaavalla tavalla ja ottamaan yhtä tehokkaasti PVC-kompaundia talteen. [48]

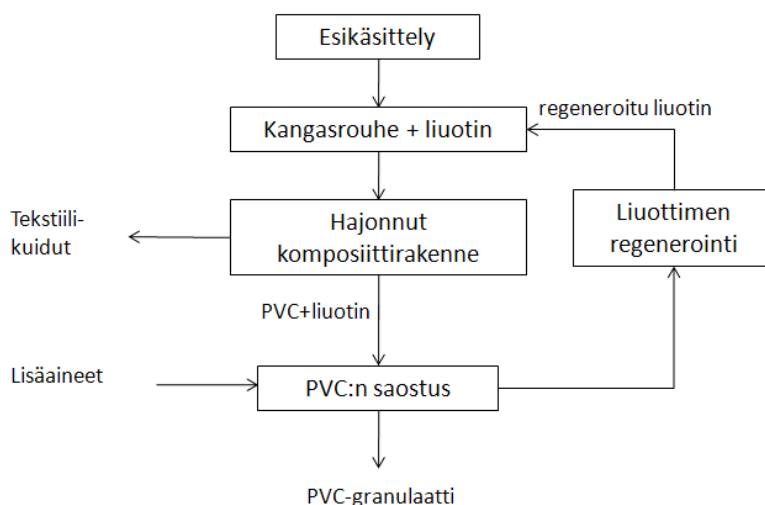
6.5.1. Syötemateriaali ja kapasiteetti

Prosessiin syötemateriaaliksi soveltuvat sähköjohdot, kaapelit, pinnoitetut kankaat, lattiapäällysteet, kovat profiilit ja kattomateriaalit, vesieristysmateriaalit, synteettinen nahka sekä autoteollisuuden PVC-tuotteet. Syötteen tulee olla kohtalaisen laadukasta ja jätėjakeet syötetään erillisinä jätėjakeina. PCB-pitoisuus ei saa ylittää 50 ppm ja epäpuhtauksien määrä saa olla enintään 30 % syötteestä. [45] Syötteeksi soveltuvaa jätettä voisi olla Suomessa saatavissa 6200...7900 t/v (taulukko 6.1.). Vertailun vuoksi todettakoon, että vuonna 2008 Ferraran tehtaassa jätettä käsiteltiin 11 500 tonnia. [44]

6.5.2. Prosessi

Menetelmässä syöte jaetaan PVC-rikkaaseen ja PVC-köyhään fraktioon. Teknisistä ja taloudellisista syistä syötteen PVC-pitoisuus tulee olla vähintään 80 p- %. Esikäsittelyssä syöte puhdistetaan ja raekokoa pienennetään repijöillä, leikkureilla ja myllyillä. PVC-komposiittirakenteen liuotus tapahtuu suljetussa reaktorissa korkeassa paineessa pesemällä kuumalla liuottimella. Liuotus hajottaa komposiittirakenteen ja kuitujae erotellaan suodattamalla PVC-jakeesta. [53]

Saostus tapahtuu lisäämällä nestemäiseen PVC-lietteeseen vesihöyryä. Samalla lisätään lisäaineet ja otetaan arvokas liuotin talteen tiivistämis-erottelumenetelmällä. PVC-kompaundi erotetaan vedestä sentrifugin avulla ja vesi kierrätetään tiheyserotuksella. PVC-kompaundi kuivataan ilmapuhalluksella. [45, 53] Yksinkertaistettu prosessikaavio nähdään kuvassa 6.4. ja tarkempi kuvaus löytyy liitteestä 4.



Kuva 6.4. Yksinkertaistettu Vinyloop-prosessi.

Jatkuvatoimisen prosessin käyttöaste Ferrarassa on 85 % vuodessa. Tehtaassa työskentelee 16 henkilöä. [53] Menetelmän huono puoli ovat korkeat energia- ja ylläpitokustannukset, sillä menetelmä vaatii enemmän ulkoista energiaa kuin termiset ja kemialliset kierrätysmenetelmät. [45] Ylläpito edellyttäisi mahdollisesti ainakin 8 henkilön työvoimaa, mikäli integrointi jätteenkäsittelylaitokseen toteutettaisiin puolet pienemmässä mittakaavassa kuin Ferraran tehdas. [53]

Prosessin integroimisesta saatavia etuja olisi, että klooripitoisen jätteen määrää poltosta saataisiin vähennettyä ja Vinyloop -teknologia edistäisi parhaiten pehmitetyn PVC:n materiaali kierrätystä. Muita etuja integroinnissa on, että prosessin edellyttämä

- höyry, energia ja paine olisivat hyvin kytkettävissä prosessiin,
- jätevedet saataisiin käsiteltyä,
- osa infrastruktuurista voisi olla hankittavissa käytettynä ja
- prosessiosaaminen (henkilöstö) olisi olemassa. [54]

Menetelmällä syötteestä saadaan talteen noin 85 % ja PVC-polymeereistä 98 %. Materiaalien talteenottoaste on 68 % ja energian 79 %. [45]

6.5.3. Lopputuotteet

Lopputuotteena saadaan raekokojakaumaltaan hyvin homogeeninen ja lisääaineistettu kierrätys-PVC, jota voidaan käyttää neitseellisen raaka-aineen tavoin. Mikäli materiaalihiyötysuhde on 80 %, R-PVC:tä tuotettaisiin 5000...6300 t/v. Suurin osa alkuperäisistä lisääaineista (kuten Cl, Pb ja Cd) säilyvät PVC-kompaundissa. Vaikka käyttömahdollisuudet (kuten kaapelit, lattianpäällysteet, auton osat ja lääkepakkaukset) ovat laajat, väri voi rajoittaa käyttöä [45].

6.5.4. Muut tekijät

Vinyloop-menetelmä ratkaisisi PVC-jäteongelman Suomessa sekä pehmitetyn että kovan PVC:n osalta. Edellä mainitut integroimista auttavat resurssit toisivat strategista kilpailuetua. Kaapelijätteen kierrätys voisi olla mahdollista saada mekaanisen kierrätyksen piiriin Suomessa (Aasiaan toimittamisen sijaan), mikäli kilpailukykyinen kierrätysmenetelmä löytyisi läheltä [54].

Vinyloop-patentin hankinta edellyttäisi tarkemman esiselvityksen laadintaa ja selvityksen siitä, olisiko integrointi teknisesti mahdollista pienemmässä mittakaavassa. Laitteiden minimikoko voi tulla esteeksi teknisessä toteutuksessa. Toteutuksessa suurin riski todennäköisesti olisi, että jätemäärä jäisi riittämättömäksi ja prosessin käyttöaste jäisi alhaiseksi. Prosessin integrointi edellyttäisi Vinyloop® -patentin ostamista ja valmiutta suhteellisen isoon investointiin, mikä puolestaan edellyttäisi tukirahoitusta.

Rahoitusta kannattaisi selvittää ainakin seuraavilta tahoilta: Vinyl2010, Recoviny, Tekes, Suomen Ympäristökeskus ja Ympäristöministeriö. Tukirahoituksen saaminen korkealaatuista kierrätysmateriaalia valmistavalle menetelmälle olisi todennäköisempää kuin down cycling -kierrätykselle. [54]

6.6. Raaka-ainekierrätys

Raaka-ainekierrätys pohjautuisi Dow/BSL -menetelmään. Raaka-ainekierrätyksen hyviä puolia on, että jätettä saadaan käsiteltyä suuria määriä, PVC-tuotteissa käytetyt haitalliset lisäaineet (kuten Pb, Cd ja ftalaatit) eliminoidaisiin pois materiaalikierrasta ja samassa prosessissa voitaisiin käsitellä myös muita klooripitoisia jätteitä. Menetelmä sopii hyvin likaiselle ja heterogeeniselle PVC-jätteelle, joka juurikin muodostaa pääosan Suomen PVC-jätteestä. Rumpu-uunipolttolaitoksen kilpailuetuja olisivat jätteenkäsittelylaitoksessa jo olemassa oleva infrastruktuuri, jätteenpoltto-osaaminen ja mahdollisesti esimerkiksi käytöstä poistuvaa kalustoa.

6.6.1. Syötemateriaali ja kapasiteetti

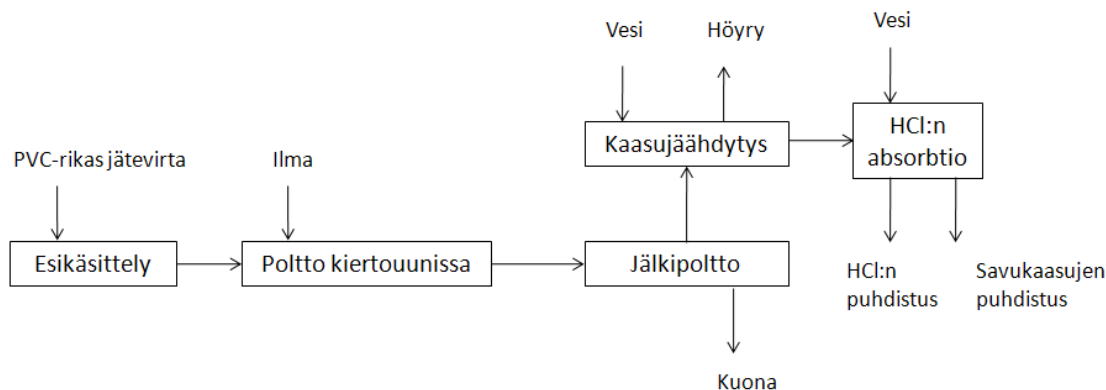
Syötemateriaaliksi soveltuu sekä pehmitetty että kova PVC. Syötteen klooripitoisuuden tulee olla vähintään 30 % ja enintään 50 %. [47] Suomessa post-consumer -jätettä syntyy 28 000 t/v. [6] Mikäli tästä jätemäärästä kolmasosan saataisiin hyötykäyttöön, puhuttaisiin 10 000 tonnin vuosittaisesta käsittelymäärästä. Taulukon 6.1. perusteella oletetaan syötteen määräksi 8000...10 000 t/v.

Raaka-ainekierrätyslaitosten kapasiteetti on tyypillisesti yli 100 000 t/v. [32] Menetelmän klooripitoisuuden (30–50 %) perusteella käsittelykapasiteetin tulisi olla vähintään 30 000 t/v, jotta vähintään 8000 tonnia klooripitoista jätettä saataisiin käsiteltyä.

6.6.2. Prosessi

Esimurskauksessa palakoko pienennetään 10 cm:n palakokoon. Rumpu-uunissa pystytään käsittelemään kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia jätevirtoja raaka-aineiksi ja energiaksi. Ensimmäisessä vaiheessa poltto tapahtuu 950 °C-asteessa. Uuniin lisätään ilmaa täydellisen palamisen varmistamiseksi, jolla pyritään estämään furaanien ja dioksiinien muodostuminen. Jälkipolttokäsittelyssä (900–1200 °C) tapahtuu HCl:n lopullinen vapautuminen ja talteenotto. Jälkipoltossa syntyvät kaasut jäädytetään (230–300 °C) ja höyryyn talteen otettava lämpöenergia voidaan käyttää energiantuotantoon.

Seuraavassa vaiheessa, savukaasujen puhdistuksessa, HCl poistetaan märkäpesurilla ja samalla puhdistetaan epäpuhtaudet savukaasuista. (Hyvin yksityiskohtaista kuvausta HCl:n talteenotto-prosessista ei ollut saatavilla.) Kuvassa 6.5. nähdään yksinkertaistettu kaavio raaka-ainekierrätyksestä.



Kuva 6.5. Raaka-ainekierrätyksen vaiheet. [47]

Rumpu-uuniin syötettävän jätteen PVC-pitoisuus on kontrolloitu, jottei lämmöntuotto nouse liikaa. Jätteen lämpökapasiteetin, halogeenipitoisuuden ja kuonan muodostumisasteen pohjalta määritetään optimaalinen syötteeksi sopiva jätekoostumus. Tällä tavoin varmistetaan, että jatkuvatoimisesta prosessista saadaan lopputuotteena hyvälaatuista suolahappoa. [47]

Schokopaun tehtaan kapasiteetti on 45 000 t/v ja lämmöntuotto on 25 MW (toiminta-aste 7500 h /v). Tarkempaa tietoa HCl:n talteenottovaiheesta ja -asteesta, prosessin vaatimasta työvoimasta tai ylläpidosta ei ollut saatavilla. [47]

6.6.3. Lopputuotteet

Lopputuotteena tuotetaan hyvälaatuista suolahappoa (20 %), jota voidaan hyödyntää joko itse kloorin tai vinyylidikloridin valmistuksessa tai muissa tuotantoprosesseissa. [45, 47] Suolahappoa tulisi tuottaa kuitenkin kohtalainen määrä, jotta sen valmistus olisi kannattavaa, ja etenkin mikäli se jouduttaisiin myymään ulkomaille.

Jos syötteestä (8000...10 000 t/v) saataisiin HCl:a talteen esimerkiksi 70 %:sti, markkinoille tuotettaisiin suolahappoa 5600...7000 t/v. Prosessin kiinteät jätteet ovat kuona ja suodatinjäännös. Osa suodatinjäännöksestä voidaan syöttää uudelleen rumpu-uuniin kuonan valmistamiseksi. Loput suodatinjäännöksestä joudutaan läjittämään kaatopaikalle. Pohjakuonaa voidaan käyttää täyteaineena kaivoksissa Euroopassa [47], mutta Suomessa kuonalle tulisi löytää muita käyttökohteita.

6.6.4. Muut tekijät

Menetelmä voisi olla likaisen post-consumer -jätteen käsittelyyn potentiaalinen vaihtoehto, jos PVC-jäte Suomessa saataisiin keskitettyä yhteen käsittelylaitokseen. Menetelmän hyviä puolia ovat energiantuotto ja kuonan hyötykäyttämättömyys, hyvät mahdollisuudet höyry- ja energiakytkentöihin sekä osaaminen, joka olisi saatavilla jo toiminnassa olevassa jätteenkäsittelylaitoksessa. Energian kysynnän ja hinnan noustessa tulevaisuudessa energian talteenotto polttolaitoksessa on sekä vaatimus että taloudellisesti kannattavaa.

Lopputuotteena saatavan HCl:n markkinat tulisi kartoittaa Suomessa. Mikäli ostajaa ei löydy kotimaasta, rahtikustannukset Eurooppaan nostaisivat lisää jo suhteellisen korkeita tuotantokustannuksia.

6.7. Ympäristövaikutukset

Kaikissa edellä esitetyissä menetelmissä ympäristökuormitusta syntyy kuljetuksesta aiheutuvista päästöistä, prosessin ilmanpäästöistä, kiinteistä jätteistä sekä jätevesistä. Termisessä hyödyntämisessä ilmanpäästöjä syntyy savukaasupuhdistusjärjestelmän ylläpidosta ja mekaanisessa kierrätyksessä mahdollisesta jätevesien käsittelystä.

Termisen hyödyntämisen tyypilliset ilmanpäästöt ovat hengitettävät hiukkaset, HCl, NO_x, SO₂, CO₂, Cd, Pb ja dioksiinit, joiden vapautuminen PVC:n tapauksessa on hyvin kontrolloitu prosessissa. Energiahyödyntämisessä savukaasujen puhdistuksessa syntyviä kiinteitä jätteitä ovat kalsiumkloridi, kalsiumsulfaatti ja kalsiumhydroksidi, kadmium ja lyijy sekä pohja- ja lentotuhkat. Mekaanisen kierrätyksen ympäristökuormitukset syntyvät pölypäästöistä, jätteistä, kuljetuksesta ja sähkönkulutuksesta. [2]

Uusiomateriaalin mahdollisesti sisältämä kadmium ja lyijy ovat myrkyllisiä. Ne ovat alkuaineita, eivätkä sen takia hajoa luontoon. Eräiden asiantuntijoiden mukaan ihmisten ja luonnon todellinen altistuminen näille vaikutuksille on suhteellisen pieni.

Lyijy- ja kadmiumyhdisteet ovat sidoksissa PVC-matriisiin, josta niiden vapautuminen on mahdollista kemiallisessa ja termisessä käsittelyssä sekä mahdollisesti kaatopaikoilla. Aineiden vapautuminen matriisista on kuitenkin periaatteessa mahdollista tietyissä olosuhteissa, kuten kaatopaikoilla (liukeneminen maaperään) tai jätteenkäsittelyalueilla, polttolaitoksissa tai tulipaloissa. Tällaisten tapauksien todennäköisyys on kuitenkin suhteellisen pieni ja vapautuvat raskasmetallimäärät olisivat hyvin pieniä. Nykyaikaisilla kaatopaikoilla ja polttolaitoksissa päästöt ovat hyvin kontrolloidut. [2]

7. KÄSITTELYMENETELMIEN SOVELTUVUUS

7.1. Hyödyntämismenetelmien vertailu

Käsittelymenetelmien edut ja heikkoudet on esitetty yhteenvedona taulukossa, joka löytyy liitteestä 5. Alla olevaan taulukkoon 7.1. on puolestaan koottu yhteenvedona arviot jätemääristä ja kustannuksista. Todellisten kustannusarvioiden laskeminen olisi edellyttänyt tarkempia tietoja prosesseista, rahoituksesta ja lopputuotteiden markkinoista.

Taulukko 7.1. Yhteenvedo hyödyntämismenetelmistä.

Hyödyntämis- menetelmä	Syötteen määrä (t/v)	Saatavan lopputuotteen määrä (t/v)	Materiaali- hyötysuhde (%)	Tuotanto- kust. (€/t)	Investointi- kust. (milj.€)
Jauhatus	3000...4000	2000...3000	70-80	425	1...3
Granulointi	3000...4000	2000...3000	70-80	425	1...3
Integroitu Vinyloop	6200...7900	5000...6300	80	650	10...15
Raaka-ainekierrätys	8000...10000	5600...7000	70	>500	>15

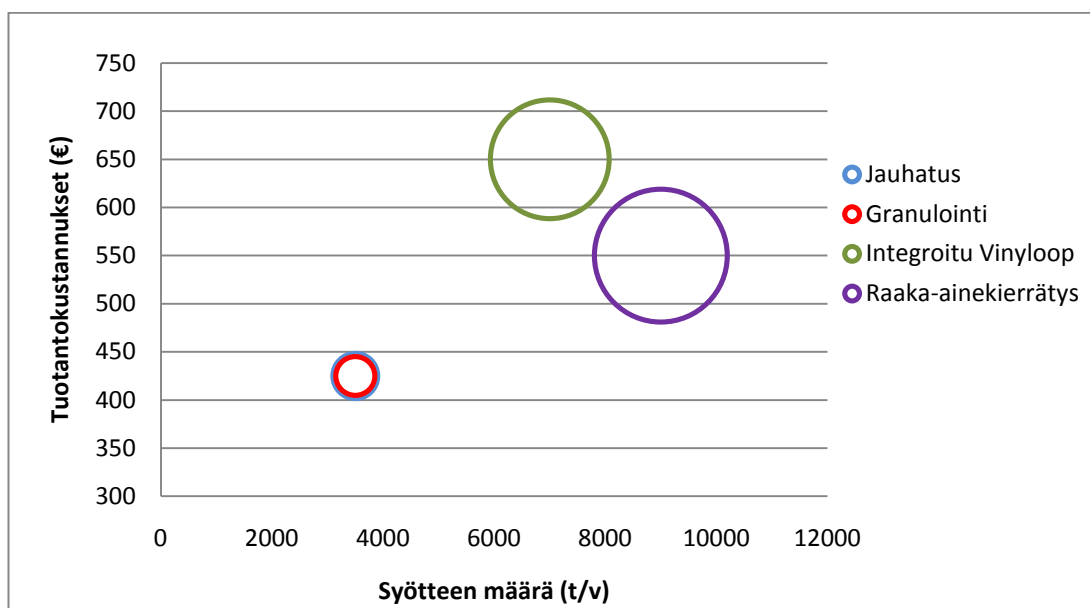
Tuotantokustannusten arvioinnissa on oletettu eri menetelmille osin yhtenäisiä kuluja, jotta menetelmät olisivat vertailukelpoisia keskenään. Keräys- ja kuljetuskustannuksille, lajittelun yksikkökustannukselle ja porttimaksulle on oletettu vakiokulut. Lisäksi on oletettu, että tuotteiden toimitus myyntiin maksaa saman verran kaikilla menetelmillä.

Tässä yhteydessä todettakoon, että rakennus- ja purkujätteen vastaanottomaksut ovat nousseet 2000-luvulla Suomessa ja vaihtelevat 85–215 €/t (sis. alv 23 %) [55]. Keskimääräinen vastaanottomaksu on tällöin 150 €/t, joten kierrätykseen houkuttelevan porttimaksun tulisi olla alle 150 €/t. Jätteen hyödyntämisestä perittävä porttimaksu voisi olla esimerkiksi 100 €/t, koska se voisi olla tulevaisuudessa realistinen ja kilpailukykyinen hinta verrattuna rakennusjätteen vastaanottomaksuun.

Perinteisellä mekaanisella kierrätyksellä saatavasta lopputuotteesta (kestomuovit ja muut sekoitteet) saatava hinta vaihtelee muovilaadusta riippuen 300–900 €/t. [32] Kirkkaasta hyvälaatuisesta pehmitetystä kierrätys-PVC:stä maksettiin vuoden 2010 lokakuussa 400–480 €/t ja sekavärisestä 340–420 €/t. Molempien laatujuen hinnat ovat nousseet edellisestä vuodesta. [56] Tuotantojätteestä valmistetusta PVC-murskeesta saatava hinta on 100–150 €/t, jonka lisäksi tuottaja maksaa rahtikulut. [11] Suolahapon keskihinta oli heinäkuussa 2010 Euroopassa 100–120 €/t. [57]

Perinteisten kierrätysmenetelmien investoinnista arvioidaan syntyvän karkeasti 1...3 miljoonan euron kustannukset, Vinyloop -prosessista 10...15 miljoonaa euroa ja raaka-

ainekierrätyksestä yli 15 miljoonan euron kustannukset. Kuvassa 7.1. on esitetty menetelmät pistekaaviona. Arvopisteen kuplan koko osoittaa investointikustannusten arvon. Jauhatus- ja granulointimenetelmien kuplat ovat päällekkäiset.



Kuva 7.1. Hyödyntämismenetelmien vertailu.

Perinteisillä mekaanisilla kierrätysmenetelmillä investointikustannukset ovat pienet, mutta vastaavasti myös käsiteltävän jätteen määrä. Vinyloop -menetelmän integrointi maksaisi huomattavasti enemmän, mutta käsiteltävän jätteen määrä olisi jopa kaksinkertainen. HCl:n valmistuksesta aiheutuisivat todennäköisesti suurimmat investointi- ja tuotantokustannukset, mutta toisaalta sillä olisi hyödyntämismenetelmien suurin jätteenkäsittelyvolyymi.

7.2. Lopputuotteiden käyttömahdollisuudet

7.2.1. Jauhe ja rouhe

PVC-muovirouheelle sopivia käyttökohteita ovat palloilukenttien tekonurmet, raviradat ja ratsastuskentät. Lisäksi voitaisiin selvittää, onko käyttö asfaltin täyteaineena tai urheilukenttien alustoissa mahdollista. Vaativissa olosuhteissa käytettävät karkeat työhanskat ja pihalaatat voisivat olla mahdollisia käyttökohteita.

Vinyloop -prosessista saatavalle Recinyl® -lopputuotteelle voisi löytyä Suomesta markkinoita, sillä hyvälaatuinen R-PVC on standardoitu ja lisääaineistettavissa asiakasta varten. Jauhatusmenetelmän lopputuotteena saatavaa jauhetta voitaisiin käyttää esimerkiksi maanrakennustuotteissa, kuten letkuissa tai eristeissä. Muita käyttökohteita on koottu taulukkoon 7.2.

Taulukko 7.2. Ehdotuksia lopputuotteiden käyttökohteista.

Jauhe	Rouhe
Akustiikkalevyt	Asfaltin täyteaine
Jäte- ja roskasäiliöt	Melusuojien täyteaine
Kitkapinnat	Pihalaatat
Kypärien sisärakenteet	PVC-työhanskat
Leikkivälineet	Ratsastuskentät
Letkut maarakennuksessa	Raviradat
Liikennetolpat	Tekonurmet
Nurminauhat	Urheilukenttien alustat
Telakuljettimet	
Teollisuushallien lattiamatot	
Turvalattiat ja -laatat	
Vesi- ja lämpöeriste	

Rouhetta ja jauhetta voitaisiin yrittää myydä myös ulkomaille. Saksalainen Kohli Chemie GmbH välittää ja jatkojalostaa muovia ja vastaanottaa muovia eri muodoissa (hylkymuovit, rouheet ja jauheet). Yrityksen kautta on avautunut markkinat uusiomateriaalille ainakin Muovix Oy:llä. [58]

7.2.2. HCl

Suolahapon yksi tärkeimmistä käyttösektoreista on terästeollisuus, koska sen avulla saadaan poistettua tehokkaasti ruostetta metallista. Suolahappoa käytetään peittausprosesseissa hiiliteräksillä, seostetuilla teräksillä ja ruostumattomalla teräksellä. Suolahapon käyttöä ja kysyntää suomalaisissa terästehtaissa voisi selvittää tarkemmin.

Suolahappoa voidaan käyttää myös muurausjälkien puhdistukseen ja sementin syövyttämiseen. Laimeana liuksena suolahappoa on mahdollista käyttää myös uima-altaiden puhdistuksessa. Muita käyttökohteita ovat elintarviketeollisuus, kodinpuhdistusaineet ja erilaiset kotitaloustuotteet. [59]

Vuonna 2005 Kemira Oyj hankki koko Finnish Chemicals Oy:n osakekannan ja siten määräysvallan Finnish Chemicals Oy:ssä. Finnish Chemicalsin suolahapon markkinoiden arvo vuonna 2004 Suomessa oli noin 6,1 miljoonaa euroa ja sen markkinaosuus vastasi tuolloin noin 60–70 % Suomen suolahappomarkkinoista. [60]

7.3. Menetelmien markkinapotentiaali

Perinteinen mekaaninen kierrätys edellyttäisi pehmitetyn PVC:n tehokasta keräystä, jotta uusiomateriaalia saataisiin tuotettua edes jonkinlainen määrä. Samoin Vinyloop -prosessi edellyttäisi kohtalaisen suurta keräyssaantoa ja huolellista lajittelua. Vinyloop -prosessiin investointiin liittyy suurempi riski kuin yksinkertaisiin menetelmiin – entä jos jätemäärä jääkin odotettua vähemmäksi? Toisaalta kestävän kehityksen ja energia- ja materiaalitehokkuuden kannalta Vinyloop -prosessin jalkauttaminen Suomeen olisi iso edistysaskel PVC-muovin mekaanisessa kierrätyksessä Suomessa ja Pohjoismaissa.

Vinyloop-tyyppinen prosessi vastaisi mahdollisesti parhaiten tulevaisuuden materiaalikierrätysvaatimuksiin. Vinyloop -menetelmän kannattavuuteen vaikuttaa keskeisesti lopputuotteen hinta, ja mielenkiintoista onkin, että onko R-PVC:stä mahdollista saada todella neitseellistä PVC:tä vastaava hinta?

Perinteisellä mekaanisella kierrätyksellä edistettäisiin PVC:n materiaalikierrätystä ja saataisiin samalla vähennettyä polttoon päätyvän PVC:n määrää. Lopputuotteen laatua on kuitenkin vaikea arvioida ilman pilottitestausta ja saanto voi jäädä arvioitua pienemmäksi. Perinteisten kierrätysmenetelmiin investointi olisi edullisempaa, mutta tuottojen saanti toisaalta riskialttiimpaa.

Raaka-ainekierrätys olisi lähellä ydinosamista siinä tapauksessa, että jätteenkäsittelylaitoksen oletetaan hyödyntävän jätettä energiana. Tällöin kilpailuetuna olisi hyvä integroitavuus ja se, että käsittelylaitos pystyisi käsittelemään parhaimmassa tapauksessa suuria määriä post-consumer -jätettä, mikäli kaatopaikkakielto astuisi tulevaisuudessa voimaan ja likainen jäte olisi pakko toimittaa johonkin hyödynnettäväksi. Sekä Vinyloop- prosessin että raaka-ainekierrätyksen varjopuolia ovat isot investointi- ja käyttökustannukset. Molemmat menetelmät edellyttäisivät lainanottoa ja tukirahoituksen saamista. Todellisen kannattavuuden laskeminen raaka-ainekierrätyksen osalta edellyttäisi lisätietojen saamista Dow/BSL -laitokselta. Lisäksi tulisi kartoittaa, minkälaista infrastruktuuria olisi mahdollisesti käytettävissä, ja kuinka paljon käsittelylaitoksen savukaasunpuhdistuksesta aiheutuu tällä hetkellä todellisia kustannuksia.

8. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Työn kokeellisessa osiossa simuloitiin materiaalkierrätystä. Tarkoituksena oli tutkia pehmitetyn PVC:n kierrätystä tutkimalla prosessoinnin aiheuttamia muutoksia materiaalikoostumuksessa ja -ominaisuuksissa. Lisäksi tarkoituksena oli selvittää kierrätysmateriaalin vaikutusta prosessointiin sekä havaita mahdollisia ongelmia kierrätyksessä.

Aikaisemmin Tampereen teknillisessä yliopistossa muovien uusiokäytön tutkimuskohteina ovat olleet muun muassa PVB, PBT ja PET.

Kokeellinen tutkimus koostuu seitsemästä osasta:

- | | |
|-------------------|--------------------------------------|
| 1. Materiaali | 4. Seosten teko |
| 2. Ekstruusioajot | 5. Koesauvojen valmistus |
| 3. Rouhinta | 6. Analyysien suoritus ja laitteisto |

8.1. Materiaali

Kokeellisessa osiossa käytetty materiaali oli pehmitettyä PVC:tä. Neitseellinen granulaatti ennen prosessointia väriltään kirkkaansamea ja prosessoinnin jälkeen kirkas (kuvat 8.1. ja 8.2.).



Kuva 8.1. Neitseellinen materiaali.



Kuva 8.2. Kertaalleen prosessoitu materiaali.

Materiaali soveltuu puutarhaletkujen valmistukseen ja profiileihin. Materiaalin taipumisominaisuudet säilyvät alhaisessakin lämpötilassa. Valmistajan antamien tietojen mukaan materiaalin Shore-kovuus on 65 (ISO 868-standardi) ja murtolujuus 12 N/mm² ja murtovenymä 350 % (ISO 527 -standardi). [61]

8.2. Ekstruusioajot

Materiaalin prosessointiin käytettiin Brabender Plasti-corder PL 2000 yksiruuviekstruuderia (kuva 8.3.). Laitteella voidaan valmistaa erilaisia profiileja, kuten kalvoa tai tankoa, sekä sekoittaa muovin joukkoon lisä- ja seosaineita eli tehdä kompaundeja. Laitteen maksimikiertosnopeus 120 rpm.



Kuva 8.3. Brabender yksiruuviekstruuder.

Ensimmäisellä ajokerralla neitseellisestä PVC:stä valmistettiin nauhamaista profiilia, jonka paksuus oli 2mm. Ruuvinopeus oli 21 rpm ja suutinlämpötilaksi oli säädetty 195 °C.

Toisella ajokerralla saatu nauha oli paksuudeltaan jonkin verran epätasaisempaa. Annostelijaan syötettäessä pehmeät granulaatit takertuivat toisiinsa muodostaen granulaattiryppäitä, mikä aiheutti epätasaista annostelua, nauhapaksuuden vaihtelua ja nauhan katkeilua. Lisäksi yksittäisiä granulaatteja tarttui annostelijan metalliseiniin.

Annostelun tasaisuuden parantamiseksi käytettiin tärinäefektiä, mikä hieman auttoi materiaalin syöttöä. Koska myöskään granulaattien painaminen työkalulla kohti syöttöaukkoa ei parantanut annostelun tasaisuutta, tyhjennettiin annostelija ja vaihdettiin syöttö tasaiseen manuaaliannosteluun. Jatkuvalla manuaalisella syötöllä nauhan valmistus kierrätysmateriaalista onnistui.

Pehmeän kierrätysmateriaalin ja ruuvin seinämän välillä syntynyt kitkalämpö lisäsi sulan virtaavuutta ruuvissa, mikä osaltaan vaikutti nauhan ohenevuuteen. Lisäksi uusiogranulaatit olivat muodoltaan pitkänomaisia, mikä edesauttoi niiden limikkäin asettumista ja toisiinsa takertumista. Metallisen annostelijan suuaukko oli saattanut lämmitä usean tunnin prosessoinnin seurauksena jäähtytyksestä huolimatta, jolloin uusiogranulaatit alkoivat pehmetä jo ennen ruuviin pääsyä.

Käytetty ruuvinopeus oli 21–23 rpm ja sylinterilämpötiloiksi oli asetettu samat arvot kaikilla ajokerroilla. Ekstruusioajoarvot löytyvät liitteestä 6.

8.3. Rouhinta

Ekstruuderin suuttimelta tullut nauha jäähdytettiin välittömästi jäähdytysaltaassa, jonka jälkeen nauha ohjattiin telojen välistä rouhimeen. Rouhinnan tarkoituksena oli valmistaa materiaalista tasalaatuista granulaattia uudelleenprosessointia varten. Granulaattikoko pyrittiin saamaan lähelle neitseellisen granulaatin kokoa.

Neitseellisen materiaalin rouhinta onnistui ongelmitta. Kierrätysmateriaalin nauhapaksuuden vaihtelu ja katkonaisuus aiheutti ongelmia rouhimisessa. Nauhaa jouduttiin syöttämään käsiohjatusti rouhimen telojen väliin.

8.4. Seosten teko

Seosten teon tarkoituksena oli valmistaa kierrätysmateriaalia ja neitseellistä materiaalia sisältäviä kompaundeja. Seoksia valmistettiin kuusi:

- 20 p- % 1.kerran prosessoitu PVC + 80 p- % neitseellinen PVC
- 40 p- % 1.kerran prosessoitu PVC + 60 p- % neitseellinen PVC
- 60 p- % 1.kerran prosessoitu PVC + 40 p- % neitseellinen PVC

- 20 p- % 2.kertaa prosessoitu + 80 p- % neitseellinen PVC
- 40 p- % 2.kertaa prosessoitu + 60 p- % neitseellinen PVC
- 60 p- % 2.kertaa prosessoitu + 40 p- % neitseellinen PVC

Lisäksi valmistettiin koesauvat neitseellisestä materiaalista. Seosten valmistamiseksi granulaatit punnittiin ja sekoitettiin hyvin keskenään ennen ruiskuvalua.

8.5. Koesauvojen valmistus

Koesauvojen valmistukseen käytettiin Krauss-Maffei KM50-C2 ruiskuvalukonetta (kuva 8.4.). Laite soveltuu pienten kappaleiden ruiskuvaluun, ja sillä voidaan valmistaa standardien mukaisia koesauvoja. Koneen sulkuvoima on 500 kN ja maksimiruiskutusaine 2259 baria. [62]



Kuva 8.4. Ruiskuvalukone Krauss-Maffei KM50C2. [62]

Koesauvat valmistettiin kaksipesäisellä muotilla standardin SFS-EN ISO-527 mukaisiksi. Koesauvojen valmistus ruiskuvalulla onnistui hyvin. Prosessoitaessa ei syntynyt käryjä ja materiaalin syöttö onnistui pääasiallisesti ilman käsiavustusta. Valettu tuote jouduttiin poistamaan muotista käsiavusteisesti, koska pehmeä tuote jäi kiinni muottiin.

Kertaalleen prosessoidut materiaalit onnistuttiin ruiskuvalamaan lähes samoilla ajoarvoilla kuin neitseellinen materiaali. Keskeisimmät parametrimuutokset tehtiin vaihdettaessa materiaali kertaalleen prosessoiduista jo kahdesti prosessoituihin. Jotta kahteen kertaan prosessoiduista seoksista onnistuttiin valmistamaan pinnanlaadultaan hyviä koesauvoja, parametriarvoja pienennettiin annostusmatkan, jälkipaineajan sekä sylinterilämpötilojen osalta. Koesauvojen valmistuksessa käytetyt ajoarvot on esitetty liitteessä 7.

Osaan koesauvoista syntyi imuja pinnalle tai sauvan sisälle saattoi jäädä ilmakupla, mikä aiheutti jonkin verran hävikkiä. Koesauvaerässä, joka sisälsi 60 p- % kertaalleen kierrätettyä PVC:tä, erän viimeisistä sauvoista tuli selkeästi kellertäviä. Kellertävä väri saattoi johtua kohonneesta prosessointilämmöstä ja suuresta kierrätysmateriaalipitoisuudesta. Kuvassa 8.5. nähdään koesauvat. Ylimpänä on neitseellinen materiaali, toisena 60 p- % yhden kerran kierrätettyä sisältänyt materiaali ja kolmantena 60 p- % kaksi kertaa kierrätettyä materiaali. Alimmaisena on väripoikkeamasta kärsinyt koesauva.



Kuva 8.5. Koesauvat.

Yhtä väripoikkeamaa lukuun ottamatta eroavaisuuksia ei juuri havaittu neitseellisen ja kierrätysmateriaalia sisältäneiden koesauvojen välillä. Kahteen kertaan prosessoitua materiaalia sisältäneet kompaundit ruiskuvalettiin 5 °C alhaisemmassa lämpötilassa. Kierrätyksen seurauksena polymeeriketjut lyhenevät, mikä vaikuttaa polymeerin virtausominaisuuksiin.

8.6. Analyysien suoritus ja laitteisto

Materiaalien tutkimiseen käytettiin seuraavia analyysijä:

- Kvalitatiivinen koostumusanalyysi
- Kvantitatiivinen analyysi
- Termogravinen analyysi (TGA)
- Dynaaminen mekaaninen analyysi (DMA)
- Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria (DSC)
- Shore-kovuus
- Vetokoe
- Visuaalinen tarkastelu

Kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen analyysi tilattiin alihankintana. Muut analyysit ja testaukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratoriossa.

8.6.1. Kvalitatiivinen koostumusanalyysi

Kvalitatiivisen py-GC-MS -analyysin eli pyrolyysi-kaasukromatografia-massaspektrometri -tekniikan avulla oli tarkoituksena selvittää materiaalin koostumus. Koostumusanalyysissä käytettäviä tekniikoita ovat muun muassa kaasukromatografia-massaspektrometri, pyrolyysi, IR-spektroskopia, nestekromatografia, termogravimetria ja titraus. [63]

Koostumusanalyysit tehtiin neitseelliselle ja kertaalleen prosessoidulle materiaalille. Koostumusanalyysin tulokset esitetään kromatogrammien avulla, joista voidaan päätellä materiaalin sisältämät keskeiset orgaaniset aineet.

8.6.2. Kvantitatiivinen analyysi

Kvantitatiivisen GC-MS -analyysin tarkoituksena oli tutkia yksilöidyn ftalaatin määrä materiaalissa. Analysoitavat näytteet olivat neitseellisestä materiaalista ruiskuvalettu koesauva ja 60 p- % kaksi kahteen kertaan prosessoitua materiaalia sisältänyt koesauva. Analysoitavaksi valittiin materiaalit työstökertojen ääripäistä, jotta mahdolliset ftalaattimäärien muutokset tulisivat varmasti esille.

8.6.3. Termogravimetrinen analyysi

Termogravimetria (TGA) määrittää näytteen massan muutoksen, kun lämpötilaa nostetaan, lasketaan tai pidetään vakiolämpötilassa. Analyysi voi olla joko staattinen tai dynaaminen. Käytännössä enemmän tietoa antaa dynaaminen termogravimetria, jossa lämpötilan muutos pyritään toteuttamaan vakionopeudella.

TG-analyysin tuloksena saadaan käyrä, jossa on kuvattuna näytteen paino lämpötilan tai ajan funktiona. TG-käyrästä nähdään painonmuutos, polymeerin hajoamislämpötila sekä se, että koostuuko hajoamisreaktio vain yhdestä vai useammasta

päällekkäisestä reaktiosta. [64] Analyysissä käytetty termogravimetrilaitteisto oli Pyris TGA 6 ja näyte neitseellinen PVC-granulaatti. Lämmitysväli oli 30...1000 °C ja lämmitysnopeus 20 °C/min.

8.6.4. DMA-analyysi

Dynaamis-mekaanisella analyysillä voidaan tutkia materiaalien dynaamisia ominaisuuksia, kuten häviö- ja varastomoduuleja, häviökerrointa ja materiaalin stabiilisuutta. Laitteella voidaan karakterisoida materiaalin elastisia, viskooseja ja viskoelastisia ominaisuuksia lämpötilan, ajan, taajuuden, jännityksen ja venymän funktiona. Analyysissä voidaan käyttää eri kuormitustapoja, kuten vetoa, taivutusta tai leikkausta. [64]

Tulokset esitetään yleensä DMA-kuvaajan avulla. Kuvaajissa dynaaminen varastomoduli E' on verrannollinen materiaalin kimmomoduliin ja jäykkyyteen. Dynaaminen häviömoduli E'' kuvaa energian häviämistä lämpönä muodonmuutoksen aikana lämpötilan funktiona. Vaimennustekijä $\tan \delta$ kuvaa viskoosien ja elastisten prosessien suhdetta lämpötilan funktiona. [64]

Analyysissä käytetty laitteisto oli Pyris Diamond DMA. Analyysit tehtiin neitseellisestä materiaalista valmistetulle koeksuvalle ja kahteen kertaan kierrätetylle (60 p- %) koeksuvalle. Kuormitustyyppinä käytettiin kolmipistetaivutusta. Molemmissa analyyseissä vakioamplitudi oli 40 μm ja lämmitysnopeus 3 °C/min. Lämpötila-alue oli -80..180 °C.

8.6.5. DSC-analyysi

Differentiaalisessa pyyhkäisykalorimetriassa mitataan näytteessä tapahtuvien reaktioiden sitomaa tai vapauttamaa lämpöenergian määrää, jolloin voidaan tulkita näytemateriaalissa tapahtuvia entalpiamuutoksia käyrien avulla. Näytteeseen ja vertailunäytteeseen tuodun energian määrä mitataan ja tulostetaan DSC-käyränä. Yleensä polymeereistä määritettäviä kohteita ovat lasisiirtymälämpötila, sulamispiste, kiteisyysaste, hajoamislämpötila, sulamis- ja kiteytymislämmöt sekä ominaislämpökapasiteetti. [64]

Analysoinnissa käytetty laitteisto oli Netzsch DSC 204 F1. Tutkittavat näytteet olivat neitseellisestä materiaalista valmistettu koeksuva ja kahdesti kierrätettyä materiaalia (60 p- %) sisältänyt koeksuva. Analyysissä jäähdytyksessä käytettiin nestetyyppijäähdytystä. Lämpötilaväli oli -100...150 °C ja lämmitysnopeus oli 20 kelviniä minuutissa.

8.6.6. Shore-kovuuden mittaus

Shore-kovuuden mittaus tehdään painamalla mittapään eli durometrin pohjalevy näytekappaleen pintaan, jolloin mittakärki painuu materiaaliin. Tuloksena saadaan painauman syvyys tietyn ajan kuluttua, joka ilmaistaan yksiköttömänä Shore-kovuutena.

Duometrejä on kahta tyyppiä: Shore A pehmeämmille materiaaleille ja Shore D kovemmille materiaaleille. Mittaukseen suositellaan käytettäväksi durometri A:ta, kun D-tyypin durometrin lukema jää alle arvon 20. Mittalukema saa arvon nolla, kun neula painautuu kokonaan materiaaliin ja arvon sata, kun tunkeumaa materiaaliin ei synny lainkaan. [64, 65]

Testattaville materiaaleille suoritettiin mittaukset AFFRI Hardness -kovuusmittauslaitteistolla standardin SFS-ISO 868 mukaisesti. Koekappaleina käytettiin koeksuojien leveintä kohtaa, jolloin mittapään kärki oli vähintään 9 mm:n päässä kaikista koekappaleen reunoista. Mittauksissa käytettiin durometri A:ta ja kaikille materiaaleille tehtiin viisi kovuusmittausta.

8.6.7. Vetokoe

Vetokokeessa venytetään vakionopeudella vetokoesauvaa. Kokeessa mitataan venymä ε ja venymää vastustava voima F . Vetokokeella voidaan selvittää materiaalin myötöjännitys, myötövenymä, kimmomoduli, vetomurtolujuus ja murtovenymä. [66]

Jännitys saadaan, kun tunnetaan koekappaleen poikkileikkauksen pinta-ala (A). Myötö- ja vetojännitys lasketaan kaavan 1 mukaan:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

jossa F on venytystä vastustava voima ja A koeksuojan poikkileikkauksen pinta-ala. Venymä lasketaan kaavan 2 mukaan:

$$\varepsilon (\%) = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2)$$

jossa L_0 on koekappaleen mittapituus ja ΔL_0 koekappaleen pituuden lisäys. [66]

Valmistetuille koeksuojille suoritettiin vetokokeet SFS-EN ISO-527-2 mukaisesti. Käytössä ollut koekappaleityyppi oli 1A. [67] Vetokokeissa käytettiin Messphysik -vetokonelaitteistoa, jonka maksimivetonopeus on 2000 mm/min. Laitteella voidaan tehdä veto- ja puristuskokeita sekä taivutuskokeita.

Vetoleukoina käytettiin erityisesti kumeille soveltuvia kiristyviä leukoja, sillä muoveille tarkoitetut leuat eivät pitäneet pehmeitä koeksuojia kiinni vedossa. Jokaiselle materiaalille tehtiin viisi vetokoetta ja kaikissa vedoissa käytettiin samaa vetonopeutta 200 mm/min. Sauvan keskimääräinen paksuus oli 3,80 mm ja leveys 10,0 mm.

9. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

9.1. Kvalitatiivinen analyysi

Kvantitatiivinen analyysi tehtiin Teknologiakeskus Ketek Oy:n toimesta Kokkolassa. Analyysissä selvisi, että neitseellisen ja kertaalleen prosessoidun materiaalin koostumukset olivat lähes samanlaiset. Py-GC/MS -menetelmällä suurimmat piikit tunnistettiin ftalaateiksi, joista parhaat vastaavuudet olivat:

- 1,2-benzenedicarboxylic acid diisooctyl ester (DIOP),
- 1,2-benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (DOP, DEHP) ja
- 1,2-benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester. [68]

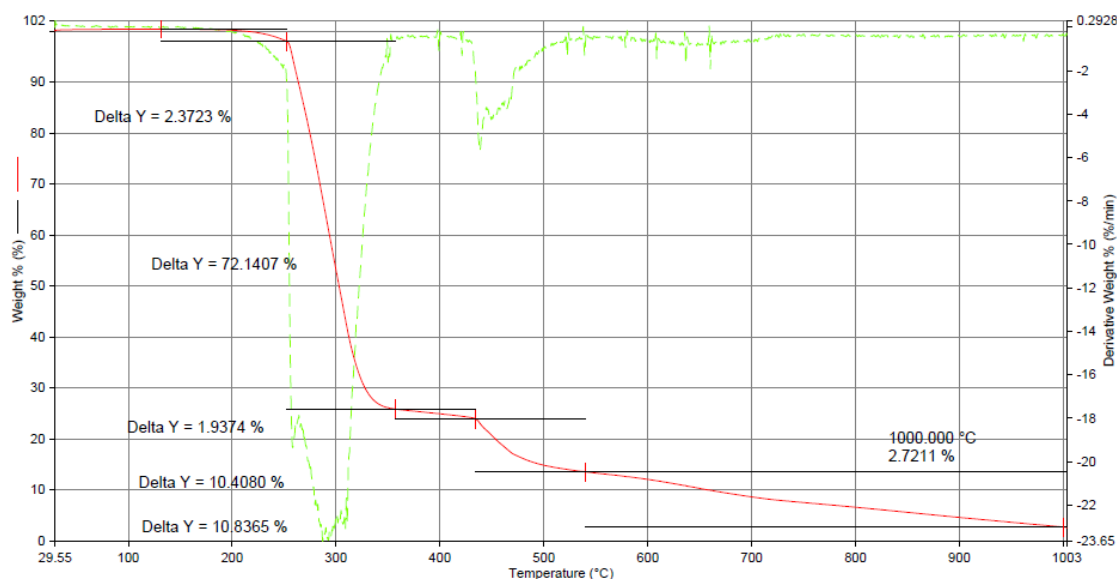
Tunnistetuista ftalaateista DEHP eli di-2-etyyliheksyyliftalaatti on eniten ja laaja-alaisimmin käytetty pehmitinaaine [7], joten se valittiin kvantitatiiviseen jatkotutkimukseen analysoitavaksi ftalaatiksi.

9.2. Kvantitatiivinen analyysi

Kvantitatiivinen analyysi tilattiin SGS Inspection Service Oy:ltä. Hong Kongin laboratoriossa tehty analyysi osoitti, että pehmitinmäärä säilyy lähes muuttumattomana uudelleenprosessointikerroista huolimatta. DEHP -pehmittimen määrä neitseellisessä näytteessä oli 34 p- % ja kierrätysmateriaalissa 35 p- %. Testaustulokset saatiin ASTM-menetelmän D3421-75 mukaisesti py-GC/MS -menetelmällä. Analyysissä selvisi lisäksi, että molemmissa näytteissä DEHP-pitoisuus ylitti REACH-asetuksen antaman rajan. [69] Ero DEHP -pitoisuuksissa on käytännössä erittäin pieni, ja se on määrittystarkkuuden rajoissa.

9.3. Termogravimetrinen analyysi

TG-käyrästä kuvassa 9.1. nähdään, että pehmitetyn PVC:n hajoamisreaktion olevan monivaiheinen. Polymeerin hajoaminen (punainen käyrä) tapahtuu lämpötilassa 250 °C ja jatkuu 360 °C asteeseen. Ftalaatin hajoaminen tapahtuu samassa kuin PVC:n hajoaminen. Delta Y:n arvo 72,1 % kuvaa massan pienenemisen muutosta tällä lämpötilavälillä.



Kuva 9.1. Neitseellisen materiaalin TG-käyrä.

Toinen lievempi hajoamisreaktio ($Y=10,4$ %) tapahtuu lämpötilassa $440...540$ °C, jonka jälkeen näyte hajoaa lopullisesti lämpötilaa nostettaessa. Vihreä käyrä kuvaa derivatiivista painonmuutosta (% /min).

9.4. DMA-analyysi

Dynaamis-mekaanisessa termoanalyysissä havaittiin neitseellisen materiaalin ja kierrätysmateriaalin DMA-käyrien olevan lähes toisiaan vastaavia (liite 8). Lasisiirtymälämpötilat jäivät analyysissä kohtalaisen alhaisiksi, mutta ne olivat kuitenkin kirjallisuuden perusteella lasisiirtymälämpötila-alueella. [29]

Kahdesti kierrätettyä materiaalia (60 p- %) sisältäneen näytteen lasisiirtymälämpötila oli vaimennustekijöiden (sininen käyrä) perusteella $11,5$ °C ja neitseellisen $10,4$ °C. Lämpötilaeron $1,1$ °C voidaan todeta olevan erittäin pieni. Häviömoduuleista (punainen käyrä) saadut lasisiirtymälämpötilat poikkesivat toisistaan vastaavasti vain $1,2$ °C. Taulukkoon 9.1. on koottu materiaalien keskeiset analyysiarvot.

Taulukko 9.1. DMA-analyysin tulokset.

	Suure	Tg (°C)	Taajuus (Hz)	Mittausalue (Pa)
Neitseellinen	Häviömoduli (E'')	-22,2	10,00	$3,2 \cdot 10^8$
	Vaimennustekijä (tan D)	10,4	10,00	
2 krt 60%	Häviömoduli (E'')	-23,4	10,00	$3,1 \cdot 10^8$
	Vaimennustekijä (tan D)	11,5	10,00	

Dynaamisten varastomodulojen (vihreä käyrä) lämpötila-arvojen pienenemisestä voidaan päätellä, että jäykkyys alkaa heikentyä molemmissa näytteissä -40 °C:n kohdalla.[64]

9.5. DSC-analyysi

DSC-käyrien perusteella ei myöskään havaittu suuria muutoksia materiaaleissa. Lasisiirtymälämpötila alkoi neutseellisellä materiaalilla lämpötilassa 43,7 °C ja kierrätysmateriaalilla lämpötilassa 47,3 °C. Lämpötilaero lasisiirtymälämpötiloissa (3,6 °C) on suhteellisen pieni ja se asettuu mittausepätarkkuuden rajoihin. [27]

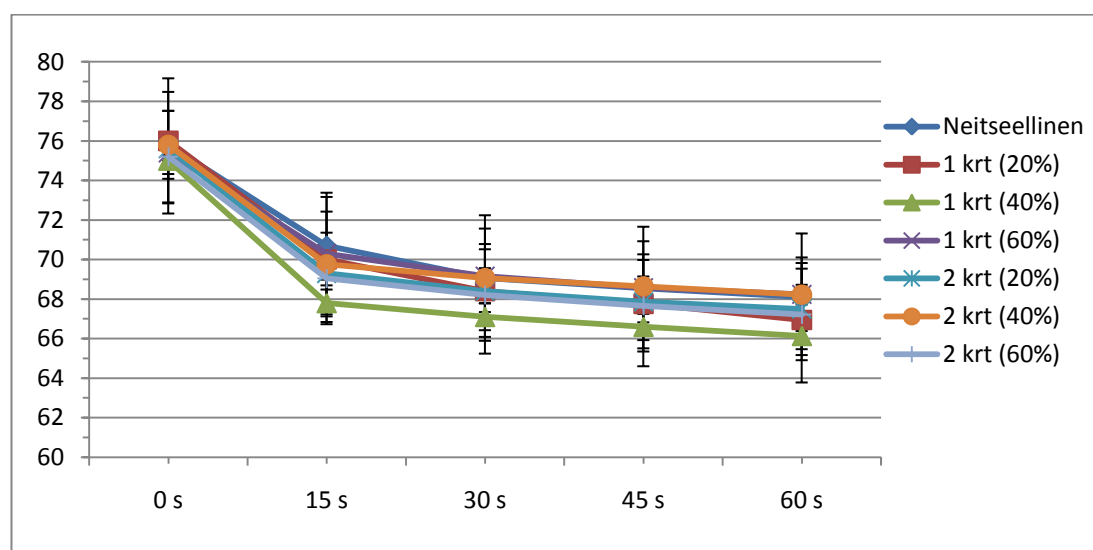
Taulukko 9.2. DSC-analyysin tulokset.

Suure	Neitseellinen	2 krt 60 %
Alkupiste (°C)	43,7	47,3
Keskipiste (°C)	53,0	55,0
Taipuminen (°C)	44,6	53,3
Loppupiste (°C)	50,3	60,4
ΔC_p (J/(g*K))	0,091	0,077

Kierrätysmateriaalin ominaislämpökapasiteetin muutos ΔC_p oli 0,077 J/(g*K), mikä oli hieman pienempi kuin ei-kierrätysmateriaalia sisältäneen näytteen, jolla ΔC_p oli 0,091 J/(g*K). Ominaislämpökapasiteeteissa ei siis myöskään havaittua merkittävää muutosta vertailumateriaaleilla. DSC-analyysitulokset on esitetty taulukossa 9.2. ja DSC-käyrät löytyvät liitteestä 9.

9.6. Shore-kovuus

Shore-kovuusmittausten perusteella kierrätysmateriaalipitoisuudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta materiaalin kovuuteen. Neitseellisen materiaalin kovuusarvot olivat keskimäärin suurimmat ja 40 p- % kerran kierrätettyä materiaalia sisältäneen heikoimmat. Kaikki mittaustulokset mukaan lukien suurin kovuusarvojen keskinäinen poikkeama eri materiaalien välillä oli 2,9 yksikköä. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 9.2.



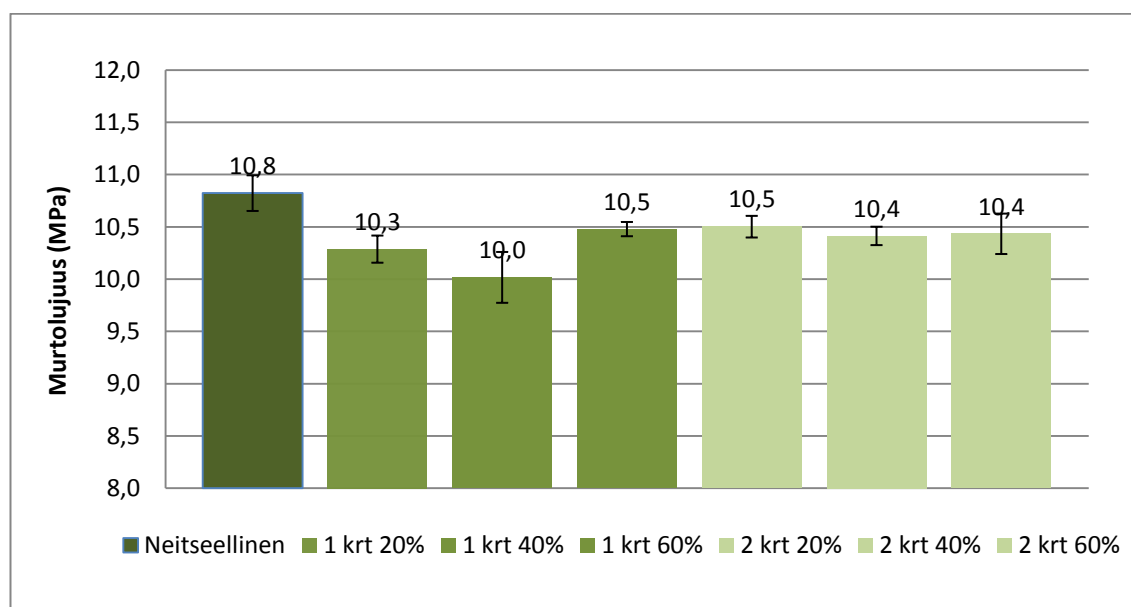
Kuva 9.2. Neitseellisen materiaalin ja kierrätysmateriaaliseosten kovuusarvot keskihajontoineen.

Suhteellisen suuret keskihajonnat tuovat tietyn epätarkkuuden tuloksiin. Tulosten perusteella havaittiin, että ääripäiden materiaalit, kaksi kertaa kierrätetty (60 p- %) materiaali ja neitseellinen materiaali, saivat lähes samat arvot. Mittauspöytäkirja keskiarvoineen ja -hajontoineen on esitetty liitteessä 10.

9.7. Vetokoe

9.7.1. Murtolujuus

Neitseellisen materiaalin murtolujuus oli noin 0,5 MPa:n suurempi kuin murtolujuus keskimäärin kierrätysseoksilla. Erot etenkin kierrätysmateriaalien keskinäisissä murtolujuuksissa olivat pieniä. Vetokokeesta saadut murtolujuudet on esitetty kuvassa 9.3. Murtolujuuksien ja murtovenymien keskiarvot keskihajontoineen löytyvät kokonaisuudessaan liitteestä 11.

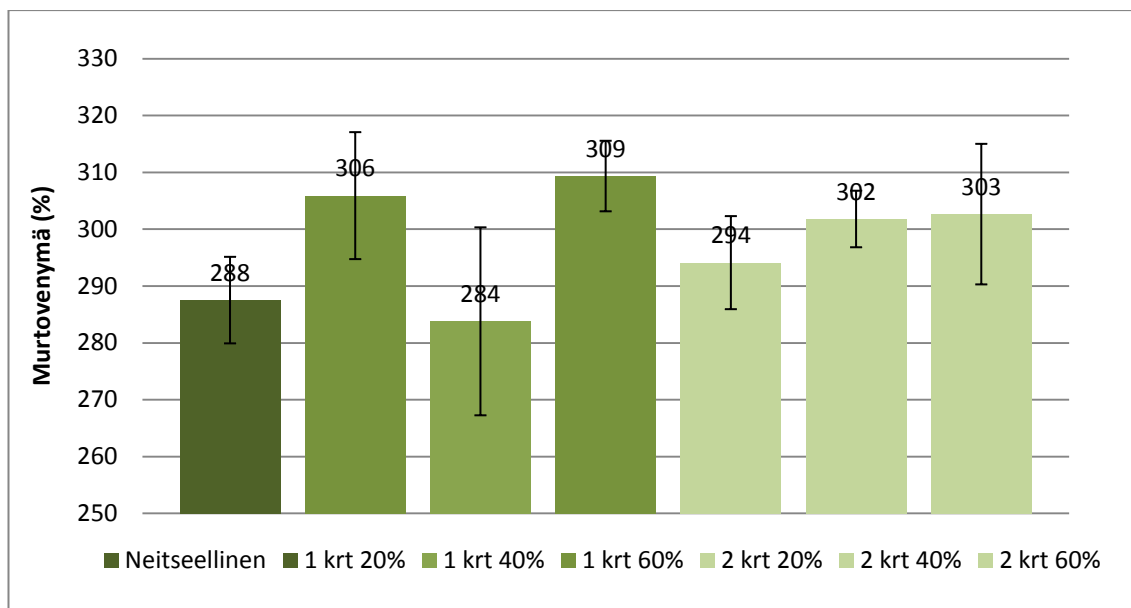


Kuva 9.3. Neitseellisen materiaalin ja kierrätysmateriaaliseosten murtolujuudet.

Yleensä lujuusominaisuuksien heikkeneminen kierrätysmuoveilla johtuu polymeeriketjujen pilkkoutumisesta. [32] Tulosten perusteella neitseellisen materiaalin murtolujuus on suurin, mutta käytännön kannalta erot lujuuksissa osoittautuivat mitättömän pieniksi.

9.7.2. Murtovenymä

Neitseellisen materiaalin murtovenymä oli 12 prosenttiyksikköä pienempi kuin kierrätysmateriaaliseosten keskiarvo (kuva 9.4.). Kierrätysmateriaaliseosten väliset erot venymissä olivat jälleen pienet.



Kuva 9.4. Neitseellisen materiaalin ja kierrätysmateriaaliseosten murtovenymät.

Keskimääräinen murtovenymä sekä kerran että kahteen kertaan kierrätettyä materiaalia sisältäneillä oli 300 %. Vetokokeessa sauvojen katkeamiskohdissa ei havaittu säännönmukaisuutta.

9.8. Visuaalinen tarkastelu

Kerran ja kaksi kertaa prosessoidut granulaatit tuntuivat tahmeilta verrattuna neitseelliseen granulaattiin. Prosessoitaessa oli mahdollisesti tapahtunut pintakäsittelyaineiden ja sähköisyyttä vähentävien lisäaineiden migratoitumista.

Neitseellisen materiaalin väri oli aluksi kirkkaansamea, mutta muuttui ensimmäisen ekstruusioajon jälkeen läpikuultavan kirkkaaksi. Hyvin pieni väriero oli havaittavissa kertaalleen prosessoidun ja kahteen kertaan prosessoidun granulaattien väreissä. Koesauvat olivat sitä kellertävämmän sävyisiä, mitä useammin materiaalia oli prosessoitu. Useasti prosessoidut materiaalit näyttivät sisältävän selkeästi enemmän prosessointilaitteistosta tarttuneita epäpuhtauksia.

Visuaalisen tarkastelun perusteella neitseellisestä materiaalista valmistetun koesauvan erotti runsaasti kierrätysmateriaalia sisältäneestä materiaalista ainoastaan tummemman värin ja koesauvassa olleen suuremman epäpuhtausasteen perusteella. Mikäli seoksissa olisi käytetty pehmitetyn PVC:n eri laatuja, värieroja olisi voinut tulla esiin stabilaattoriyhdistelmien seurauksena.

9.9. Yhteenveto tuloksista

Kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen analyysi osoittivat, ettei materiaalissa tapahtunut merkittäviä muutoksia kemiallisessa koostumuksessa. TG -käyrän perusteella PVC:n ja ftalaattien hajoaminen tapahtuu yhtäaikaaisesti, koska ftalaattien hajoamista ei näkynyt erillisenä käyränä tuloksissa.

DMA- ja DSC -analyyseissä materiaalien keskinäiset käyrät olivat lähes samankaltaiset verrattaessa neitseellistä ja kahdesti kierrätettyä (60 p- %) materiaalia. DSC-analyysin lasisiirtymälämpötila oli kuitenkin noin 30 celsiusastetta suurempi kuin DMA:lla saatu tulos, mutta molemmat arvot olivat kuitenkin lasisiirtymälämpötila-alueella 13...52 °C (30 phr pehmitinainetta). [29] DMA-analyysin tuloksen arvioitiin olevan kuitenkin luotettavampi ja lähempänä todellista arvoa. Koska valmistajan ilmoittamaa materiaalin lasisiirtymälämpötilaa ei ollut tiedossa, lasisiirtymälämpötiloja ei voitu verrata ilmoitettuun arvoon.

Kokonaisuudessaan tulokset olivat kierrätyksen kannalta erittäin hyvät. Useista prosessointikerroista huolimatta mekaaniset ominaisuudet säilyivät erinomaisesti materiaalissa, eikä koostumuksessa ilmennyt erityisiä muutoksia. Vaikka neitseellisen materiaalin kierrätystä simuloitaessa ei tule esille vanhenemisen vaikutusta materiaalissa, tulokset osoittivat kuitenkin pehmitetyn PVC:n olevan hyvin kierrätettävissä.

10. JOHTOPÄÄTÖKSET

Muovijätteen kierrätys Suomessa on yhä haasteellisempaa, kun helpot jätemuovivirrat on jo otettu kierrätyksen piiriin. Lainsäädäntö asettaa yhä tiukempia määräyksiä ja tavoitteita jätteiden hyödyntämisen suhteen, joihin vastaaminen voi olla vaikeaa ilman avustusta. Materiaalikierrätyksen tehostamiseen tarvittaisiin ohjauskeinoja, jotta jätteen toimittaminen kierrätykseen olisi houkuttelevampaa kaatopaikkasijoituksen sijaan.

Vaikka likaisten jätemuovien energiahyödyntäminen on lisääntynyt viime vuosina, PVC-muovijäte ei sovellu energiahyödyntämiseen. Pehmitetyn PVC:n on osoitettu olevan hyödynnettävissä materiaalina sekä raaka-aineena. Perinteinen mekaaninen kierrätys ja uudempiaikaiset liuotukseen perustuvat teknologiat edellyttävät kuitenkin tarpeeksi suuren ja tasaisen jätevirran. Suomessa mekaanista kierrätystä rajoittavat pehmitetyn PVC-jättemäärän vähyys ja heterogeenisyys, korkeat keräys- ja lajittelukustannukset sekä kehittymättömät uusiomuovimarkkinat.

Kierrätysmateriaalista ei olla tällä hetkellä valmiita maksamaan juuri mitään. Öljyn hinnannousu nostaa kuitenkin jatkuvasti neitseellisen muoviraaka-aineen hintaa, jolloin tulevaisuudessa markkinat antavat tilaa uusioraaka-aineelle.

Kehittyneemmän kierrätyskäsittelyn investointi- ja ylläpitokustannukset nousevat väistämättä korkeiksi verrattuna down cycling -kierrätykseen. Kierrätysliiketoiminnan tukeminen olisi taloudellisin ja lainsäädännöllisin keinoin toivottua. Recoviny -ohjelman rahoitustuki kannattaa ottaa huomioon, oli kyseessä PVC:n post-consumer -jätteen mekaaninen kierrätys tai raaka-ainekierrätys.

Työn kokeellisen osion tavoitteena oli tutkia kierrätyksen vaikutusta pehmitetyn PVC:n prosessointiin ja ominaisuuksiin. Karakterisoinnin tuloksena havaittiin kierrätysmateriaalien veto- ja kovuusominaisuuksien pysyvän käytännössä lähes vastaavina kuin neitseellisellä materiaalilla. Kierrätysmateriaaliseosten prosessointi ekstruusiolla sujui ongelmitta, kun materiaalin syöttö annostelijaan oli tasaista. Ruiskuvaluprosessoinnit onnistuivat myös hyvin oikeita ajoparametreja käytettäessä, lukuun ottamatta yhtä erää, jossa osa koesauvoista värjäytyi keltaiseksi.

Analyysitulosten perusteella kierrätyksellä ei havaittu olevan vaikutusta kemialliseen koostumukseen tutkimuksessa käytetyillä prosessointimenetelmillä. Simuloitaessa kierrätystä neitseellisellä materiaalilla ei voitu ottaa huomioon ikääntymisen vaikutusta kierrätettävyyteen. Lasisiirtymälämpötilan ja pehmitinainemäärän havaittiin pysyvän kaksi kertaa kierrätetyllä materiaalilla (60 p- %) lähes vastaavana kuin neitseellisestä materiaalista valmistetulla näytteellä.

Vaikka puhdas pehmitetty PVC on hyvin mekaanisesti kierrätettävissä, ajansaatossa kierrätettävien muovimateriaalin ominaisuudet ovat heikentyneet. Uusiomuovituotteen

valmistus kierrätys-PVC:stä edellyttäisi lisäaineiden käyttöä. Koska PVC-muovituotteissa käytetään runsaasti stabilaattoriaineita, valmistettavan uusiotuotteen stabilaattoreiden keskinäiset värivaikutukset tulisi testata. Muut ominaisuudet, kuten uusiomateriaalin väri ja laatu, riippuvat suuressa määrin syötteen laadusta. Uusiomateriaalin käyttö tuotteessa edellyttäisi uusiomateriaalin ominaisuuksien testausta ja pilottituotteen valmistuksen.

Suomen suhteellisen pienellä pehmitetyn PVC-jätteen määrällä mekaanisen kierrätyskäsittelyn syöte olisi väistämättä heterogeeninen, jotta uusioraaka-ainetta saataisiin tuotettua kohtalainen määrä, ja jotta kierrätystoimintaan investointi ja sen ylläpito olisi järkevää. Kärjistetysti tämä tarkoittaisi, että lopputuotteena saatava tuote olisi joko huonolaatuinen tai vaihtoehtoisesti tulisi investoida monimutkaisempaan käsittelymenetelmään.

Jätteen murskaaminen ja välittäminen jatkojalostettavaksi Eurooppaan voisi olla riittävä vaihtoehto siinä tapauksessa, että murskaus- ja rahtikustannukset olisivat vähemmän kuin poltossa säästetyt kustannukset. Murskeen välittäminen ei kuitenkaan olisi pitkántähtäimen kierrätysratkaisu, kuten Vinyloop- kierrätys tai raaka-ainekierrätys. Tulevaisuudessa rahtikustannusten voi olettaa nousevan öljyn hinnan noustessa. Koska EU:n lainsäädäntö ja vaatimukset kiristyvät, panostus materiaalikierrätykseen tässä vaiheessa antaisi valmiuksia vastata myös tulevaisuudessa materiaalikierrätysvaatimuksiin.

Kustannusarvioiden perusteella huomattiin Vinyloop -kierrätyksen olevan varsin kustannustehokas vaihtoehto verratessa menetelmiä keskenään, etenkin R-PVC:n myyntihinta vastaa neitseellisestä raaka-aineesta maksettavaa hintaa. Yksinkertaisten laskelmien perusteella ei kuitenkaan voida varsinaisesti suositella yhtä vaihtoehtoa, koska todellisten kustannusten laskeminen vaatisi tarkempaa lisätietoa prosesseista, rahoituksesta ja mahdollisesta käytössä olevasta infrastruktuurista.

Tulevaisuudessa kierrätysliiketoimintaa yleisesti voitaisiin tukea lisäämällä kierrätyksestä aiheutuva kustannus tuotteen hintaan ja merkitsemällä tuotteelle soveltuva kierrätysmenetelmä tuotteeseen. Tällöin esimerkiksi PVC-jäte voisi päätyä kierrätettäväksi oikealla tavalla ja kuluttaja maksaisi osuuden kierrätyksen kokonaiskustannuksista.

LÄHTEET

- [1] Järvinen, P. Uusi muovitieto. Porvoo 2008, WS Bookwell Oy. 263 sivua.
- [2] European Commission Environment Directorate. Economic Evaluation of PVC Waste Management. July 2000. 193 p. [WWW]. [viitattu 20.9.2010] Saatavissa:
http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/economic_eval.pdf
- [3] Suomen Laki. Uusi jäteverolaki - Hallituksen esitys 159/2010. [WWW]. [viitattu 5.1.2011] Saatavissa:
http://www.suomenlaki.com/tuoreimmat_lakiuudistukset/article551118.ece
- [4] Kärhä, Vesa. Toimitusjohtaja, Muoviteollisuus Ry. Helsinki. Haastattelu 6.8.2010.
- [5] Teerioja, N. & Moliis, K. Muovijäte lisääntyy vähennystavoitteista huolimatta. Uusiouutiset 2/2010, s. 24-25.
- [6] European Commission. Mechanical Recycling of PVC Wastes. January, 2000. 142 p. [WWW]. [viitattu 18.8.2010] Saatavissa:
http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/mech_recycle.pdf
- [7] Euroopan yhteisöjen komissio. Vihreä kirja – PVC ja ympäristö. Bryssel 2000. 42 sivua. [WWW]. [viitattu 30.9.2010] Saatavissa:
<http://ec.europa.eu/environment/waste/pvc/pdf/fi.pdf>
- [8] Vinyl2010. Study on the cadmium content of recycled PVC waste. December, 2009. Belgium, Vito NV. 121 sivua. [WWW]. [viitattu 17.8.2010] Saatavissa: <http://www.vinyl2010.org/library/vito-study.html>
- [9] Poropudas, M. PVC-muovin kierrätys Suomessa. Kandidaatintyö. Tampere 2010. Tampereen teknillinen yliopisto. 27 s.
- [10] Tilastokeskus. Yhdyskuntajätteet Suomessa 1997–2008. [WWW]. [viitattu 7.9.2010] Saatavissa:
http://pxweb2.stat.fi/database/statfin/ymp/jate/jate_fi.asp
- [11] Puhelinhaastattelut PVC-muovia hyödyntäviin eri alojen yrityksiin heinä- ja elokuussa 2010.

- [12] Appricod Guide Towards Sustainable Plastic Construction and Demolition Waste Management in Europe. 2006. [WWW]. [viitattu 1.9.2010]
Saatavissa:
[http://ec.europa.eu/environment/life/themes/waste/documents/guide_appri
cod.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/themes/waste/documents/guide_appri
cod.pdf)
- [13] Silvennoinen, Arto. Toimitusjohtaja, Suomen Autokierrätys Oy.
Puhelinhaastattelu 7.9.2010.
- [14] Tampereen teknillinen yliopisto. Polymeerimateriaalien perusteet. 2009.
[WWW]. [viitattu 19.8.2010] Saatavissa:
[http://www.tut.fi/plastics/polyko/materiaalit/TTY/Perus/PPDF/Polymeeri
materialienperusteet_30_1_2009.pdf](http://www.tut.fi/plastics/polyko/materiaalit/TTY/Perus/PPDF/Polymeeri
materialienperusteet_30_1_2009.pdf)
- [15] Järvelä, P. Muovi. Lahti 2010, Esa Print Oy. 70 s.
- [16] Suomen Uusiomuovi Oy. Muoviputket kiertoon. [WWW]. [viitattu
16.9.2010] Saatavissa:
http://www.suomenuusiomuovi.fi/fin/muoviputket_kiertoon/
- [17] Saarinen, E. Yhdyskuntajätteestä yhä enemmän polttoon. Uusiouutiset
1/2010, s. 25.
- [18] Ekokem – EU:n jätestrategiassa määritelty jätehierarkia. [WWW]. [viitattu
18.8.2010] Saatavissa:
[http://www.ekokem.fi/portal/fi/koulutus_ja_opastus/jatteiden_synnyin_ehk
aisy/eu_n_jatestrategiassa_maaritelty_jatehierarkia/](http://www.ekokem.fi/portal/fi/koulutus_ja_opastus/jatteiden_synnyin_ehk
aisy/eu_n_jatestrategiassa_maaritelty_jatehierarkia/)
- [19] Suomen jätelaki 1072/1993. [WWW]. [viitattu 18.8.2010] Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1993/19931072>
- [20] Ympäristöministeriö. Valtakunnallinen jätesuunnitelma. [WWW]. [viitattu
18.8.2010] Saatavissa:
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=322054&lan=fi&clan=fi>
- [21] Valtioneuvoston päätös pakkauksista ja pakkausjätteestä 962/1997.
[WWW]. [viitattu 19.8.2010] Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1997/19970962>
- [22] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/53/EY. [WWW].
[viitattu 18.8.2010] Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2004/20040581>

- [23] REACH – EU:n uusi kemikaaliasetus. 2010. [WWW]. [viitattu 18.8.2010]
Saatavissa: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fin/oj/2007/l_136/l_13620070529fi00030280.pdf
- [24] Saarinen, R. Jätevoimaloita tarvitaan. Uusiouutiset 2/2010, s. 9.
- [25] Muoviteollisuus Ry. PVC joka kohteeseen. 2008. 6 sivua. [WWW].
[viitattu 9.7.2010] Saatavissa:
http://www.muoviteollisuus.fi/fin/yhdistys_ja_sen_jaostot/jaostot/vinyyliryhma/
- [26] Recovynl. Recycling Rigid and Flexible PVC. 22 p. [WWW]. [viitattu 9.9.2010] Saatavissa:
<http://www.recovynl.com/docs/english/sortingguide.pdf>
- [27] Tampereen teknillinen yliopisto. Polymeerit MOL-1500. 2005. [WWW].
[viitattu 5.11.2010] Saatavuus edellyttää käyttäjätunnuksen.
- [28] EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst. Recycling and Waste Management. RW13/2010. Julkaisupäivä 30.6.2010.
- [29] Wypych, G. PVC Formulary. Toronto 2009, ChemTec Publishing. 322 p.
- [30] Polymers: A Properties Database, Poly(vinyl chloride), Plasticised.
[WWW]. [viitattu 24.11.2010] Saatavissa:
<http://poly.chemnetbase.com/entry.do?id=506&method=view&si=POLY>
- [31] Wypych, G. PVC Degradation and Stabilization. 2nd Edition. Toronto 2008, ChemTec Publishing. 442 p.
- [32] Brandrup, J., Bittner, M., Menges, G. & Michaeli, W. Recycling and Recovery of Plastics. Munich 1996, Hanser Publishers. 893 p.
- [33] Nurmi, S. PVC-pinnoitetun polyesterikankaan korvaaminen ympäristöystävällisemmillä materiaaleilla suojapeitteissä. Diplomityö. Tampere 2005. Tampereen teknillinen yliopisto. 88 s.
- [34] Scantarp Oy. Päälystystuotanto. [WWW]. [viitattu 16.11.2010].
Saatavissa: http://www.scantarp.fi/index.php?page_id=35

- [35] Lämsä, M. Muovilattianpäällysteen raaka-ainereseptin kehittäminen. Opinnäytetyö. Tampere 2008. Tampereen ammattikorkeakoulu. 48 s.
- [36] Upofloor Oy. Tuotteet. [WWW]. [viitattu 15.11.2010] Saatavissa: http://www.upofloor.fi/upofloor_fi/upofloor_oy/etusivu/tuotteet/
- [37] Zimmermann, Joachen. Toiminnanjohtaja, Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling (AgPR). Köln. Haastattelu 5.10.2010.
- [38] Dunlop Hiflex Oy. Teollisuustuotteet. [WWW]. [viitattu 5.11.2010] Saatavissa: <http://www.dunlophiflex.fi/upload/?id=c84efb39d2d4ea75f40c453f65147e18>
- [39] Lainapeite Oy. PVC-halli-esite. [WWW]. [viitattu 19.11.2010] Saatavissa: http://nss-baltic.com/files/fi/PVC-halli_esite.pdf
- [40] Meskanen, A. ja Järvelä P. Muovien kierrätys ruiskuvaluyrityksessä [Raportti 1/00] Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaaliopin laitos/Muovitekniikka 2000. 32 sivua. [WWW]. [viitattu 10.1.2011] Saatavissa: http://lab.arcada.fi/plastic%20lab/manuals_links/recycling%20in%20injection%20molding.pdf
- [41] European Commission. Optimising Markets for Recycling – Final Report. November, 2008. 562 p. [WWW]. [viitattu 29.12.2010] Saatavissa: http://ec.europa.eu/environment/enveco/waste/pdf/optimising_markets_report.pdf
- [42] Vinyl2010. Progress Report 2005. 46 p. [WWW]. [viitattu 10.1.2011] Saatavissa: http://www.stabilisers.org/_www/documents/PR2005.pdf
- [43] Roofcollect. A Second Life for Thermoplastic Roofing Membranes. [WWW]. [viitattu 11.1.2011] Saatavissa: http://www.roofcollect.com/recycling/hoser.cfm?hn_Id=6&sub_Id=157
- [44] Solvay Plastics. Vinyloop®. [WWW]. [viitattu 11.1.2011] Saatavissa: <http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/Companies/Pages/Vinyloop.aspx>

- [45] Tammelin, M, Wahlström M. ja Laine-Ylijoki J. Esiselvitys kloorin talteenotosta jätevirroista. Espoo 2010, VTT. Julkaisematon tutkimusraportti. 102 sivua.
- [46] Vinyl 2010. Progress Report 2008. 40 p. [WWW]. [viitattu 22.1.2010] Saatavissa: http://www.stabilisers.org/documents/Vinyl2010-Progress_Report_2008_V32_P-1.pdf
- [47] European Commission. Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins). December, 1999. 132 p. [WWW]. [viitattu 5.2.2011] Saatavissa: http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/chem_recycle.pdf
- [48] Vinyl2010. Progress Report 2010. 44 p. [WWW]. [viitattu 12.1.2011] Saatavissa: http://www.vinyl2010.org/images/stories/3mayvinyl2010-progress%20report%202010_layb_v16.pdf
- [49] PVC.org. PVC-recycling technologies. [WWW]. [viitattu 12.1.2011] Saatavissa: <http://www.pvc.org/Sustainability/PVC-recycling-in-Europe/PVC-recycling-technologies>
- [50] Tampereen teknillinen yliopisto. Jätehuoltotekniikan fysikaaliset ja kemialliset operaatiot BIO-4600. 2007. [WWW]. [viitattu 15.1.2011] Saatavuus edellyttää käyttäjätunnuksen.
- [51] Redwave – Sorting machine for plastic recycling, brominated out of shredded. [WWW]. [viitattu 7.1.2011] Saatavissa: <http://www.redwave.at/en/plastics-sorting.html>
- [52] Siik, K., Vuorinen, J., Anttila, P. ja Kuopanportti H. Ohjeistus lujitemuoviyrityksen jätteen käsittelyyn – KIERRÄ -projekti. TTY Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorio 2007. 16 sivua. [WWW]. [viitattu 22.1.2011] Saatavissa: http://www.ketek.fi/tiedostot/KIERRA-hanke_Vuorinen.pdf
- [53] Vinyloop®. A new Process to Regenerate PVC Compounds from Composite Residues. [WWW]. [viitattu 1.2.2011] Saatavissa: http://www.turi.org/content/download/1186/5660/file/wc_borelli.pdf
- [54] Manninen, Jorma. Kehityspäällikkö, Ekokem Oy. Haastattelu 16.12.2010.

- [55] Jätelaitosyhdistys JLY ja Kuntaliitto. Tietoa jätehuollosta – Vuoden 2009 jätemaksutiedot. [WWW]. [viitattu 3.2.2011] Saatavissa: <http://www.jly.fi/jatemaksut2009.pdf>
- [56] EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst. Recycling and Waste Management. RW No. 22. Julkaisupäivä 4.11.2010.
- [57] ICIS Pricing. Hydrochloric Acid Price Report. [WWW]. [viitattu 5.2.2011] Saatavissa: http://www.icispricing.com/il_shared/Samples/SubPage110.asp
- [58] Porra, N. 2003. Muovix puristaa jätemuovista pilttuita ja puistonpenkkejä. Taloussanomat 24.11.2003. [WWW]. [viitattu 19.1.2011] Saatavissa: <http://www.taloussanomat.fi/pdf/200328177>
- [59] Hydrochloric Acid. [WWW]. [viitattu 22.2.2011] Saatavissa: <http://www.hydrochloric-acid.co.uk/hcl>
- [60] Kilpailuvirasto. Yrityskaupan hyväksyminen; Kemira Oyj/Finnish Chemicals Oy. [WWW]. [viitattu 23.2.2011] Saatavissa: <http://www.kilpailuvirasto.fi/cgi-bin/suomi.cgi?luku=yrityskauppavalvonta/yrityskaupparatkaisut&sivu=ratk/r-2005-81-0071>
- [61] Technical Data Sheet. Flexible PVC. 10.11.2010.
- [62] TTY Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorio. Krauss-Maffei ruiskuvalukone. [WWW]. [viitattu 18.10.2010] Saatavissa: <http://www.tut.fi/public/index.cfm?MainSel=1&Sel=3778&Show=3378&Siteid=66>
- [63] Teknologiakeskus Ketek Oy. Koostumusmääritykset. [WWW]. [viitattu 23.11.2010] Saatavissa: http://www.ketek.fi/page.php?page_id=59
- [64] TTY. Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorio. 2010. Muovi intranet. [WWW]. Saatavuus edellyttää käyttäjätunnuksen.. [28.12.2010] Saatavissa: www.tut.fi/plastics/intra
- [65] SFS-EN ISO 868. Muovit ja eboniitti. Tunkeumakovuuden määrittäminen durometrillä (Shore-kovuus). 1986, Suomen standardisoimisliitto. 21 s.

- [66] SFS-EN ISO 527-1. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen. Osa 1 : Yleiset periaatteet. 1996, Suomen standardisoimisliitto. 18 s.
- [67] SFS-EN ISO 527-2. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen. Osa 2: testausolosuhteet valettaville ja ekstrudoitaville muoveille. 1996, Suomen standardisoimisliitto. 13 s.
- [68] Teknologiakeskus Ketek Oy. Raportti. Kokkola 24.11.2010.
- [69] SGS Inspection Services Oy. Testaustulokset. Hong Kong 25.1.2011.

LIITE 2: PVC:N OMINAISUUKSIA [29]

Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Mekaaniset ominaisuudet		
Tiheys	g/cm ³	1.1-1.4
Vetolujuus	MPa	
20 phr pehmitintä		34
50 phr eri pehmitinaineita		12-23.1
Venymä	%	
20 phr pehmitintä		190
50 phr eri pehmitinaineita		290-410
Kimmomoduuli	MPa	
Kova (iskusitkistämätön)		3270
80 phr pehmitinainetta		4.5
Kovuus, Shore A		
30 phr pehmitinainetta		74-90
60 phr pehmitinainetta		68-83
Termiset ominaisuudet		
Lasiirtymälämpötila (kaupallinen laatu)	°C	
5 phr pehmitinainetta		66
30 phr pehmitinainetta		13...52
100 phr pehmitinainetta		-52...-82
Haurastumislämpötila	°C	
50 phr eri pehmitinaineita		-28.6...-68.5
80 phr eri pehmitinaineita		-44...-60
PVC:n sulamislämpötila	°C	103-230
Sulamispiste	°C	185-196
Palamislämpö	MJ/kg	14.6-20.9
Sulamislämpö	kJ/mol	3.3-3.6
Ominaislämpö	J/K*kg	2100-2600
Lämpölaajenemiskerroin	10 ⁻⁵ /°C	3.5-5.0
Pehmitinaineen poistuma 150 °C:ssa tunnissa (pehmitinainepitoisuus 10...40 p-%)	p-%	
Epoksoitu soijaöljy		0.17...0.25
Di-isonyyliiftalaatti, DINP		0.74...1.49
Di-2-etyyliheksyyliiftalaatti, DOP		1.48...2.05
Di-2-etyyliheksyyliadipaatti, DOA		2.21...6.01
Bentsyylibutyliiftalaatti, BBT		1.38...3.91
1% kloorin poistuma lämpötilassa	Vuosia	
105 °C		3.6...20.7
40 °C		4x10 ⁷ ...2x10 ⁹
Syttävyyislämpötila	°C	
Ilman palonestoaineita		180
Palonestoaineiden kanssa		350...370

Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Sähköiset ominaisuudet		
Dielektrisyysvakio (1kHz)		
25°C		3.39
80°C		3.89
Triboelektrinen varautuminen	eV	4.86
Kemialliset ominaisuudet		
Hapot	ei kestä vahvoja happoja	
Emäkset	hyvä	
Liuottimet	kohtalainen	
Öljyt, rasvat	hyvä	
Kuuma vesi	kestää rajoitetusti	
Veden absorptio (48h, 50 °C ilman täyteaineita)	%	0.6
Kriittinen liukoisuuslämpötila eri pehmittimillä	°C	
Dibutyyliftalaatti (DBP)		56
Dioktyyliftalaatti (DOP)		88
Dioktyyliadipaatti (DOA)		105
Terveys ja turvallisuus		
Sallitut altistusrajat		
Cd ja sen yhdisteet	mg m ⁻³	0.005
Pb ja sen yhdisteet	mg m ⁻³	0.05
Sn-yhdisteet, triokresyylifosfaatti	mg m ⁻³	0.1
Al(OH) ₃ yhdisteet	mg m ⁻³	0.5
Vinyylikloridi	ppm	1
Trifenyylifosfaatti	mg m ⁻³	3
Hiilimusta	mg m ⁻³	3.5
Pölyt, jotkin fosfaatit ja ftalaatit		5
HCl	mg m ⁻³	7
TiO ₂	mg m ⁻³	15
Ympäristö		
Biohajoavuus	Ei hajoa helposti luonnossa	
Ympäristömyrkyllisyys	Ei haitallisia ekologisia vaikutuksia tiedossa tai odotettavissa normaalissa käytössä	

LIITE 3: JÄTEMÄÄRÄLASKELMA

LATTIAMATOT							
Kategoria t/kohde	Kaupunkien lkm	Purkukohteiden lkm	Asuintalo (7krs.) 5,2	Purkukohteiden lkm	Iso toimitilarakennus (4 krs.) 5,4	Purkukohteiden lkm	Rivitalo (4*55 m2) 0,53
A	8	5	206,4	1	21,5	1	4,22
B	5	10	258,0	1	26,9	3	7,92
C	5	25	645,0	3	80,6	5	13,20
		Jättemäärä	1109,4		129,0		25,34
		Jättemäärä (t/v)					1 332

LATTIALAATAT					
Kategoria t/kohde	Kaupunkien lkm	Purkukohteiden lkm	Julkirakennus 2,5	Purkukohteiden lkm	Kerrostalo 3,0
A	8	0,5	10,1	1	24
B	5	1	12,6	2	30
C	5	1,5	18,9	3	45
		Jättemäärä	41,6		99
		Jättemäärä (t/v)			141

MUUT KOHTEET			SUOJAPUITTEET				KEVYT PEITTEET	
Kategoria t/kohde	Kaupunkien lkm	Purkukohteiden lkm	LIIKUNTAHALLI 3,6	Purkukohteiden lkm	Iso saneeraus kohde 5,2	Pieni saneeraus kohde 2,0	Purkukohteiden lkm	Kerrostalon julkisivu 0,31
A	8	0,5	14,4	5	208	78,0	3	7,5
B	5	1	18,0	10	260	97,5	10	15,6
C	5	2	36,0	25	650	243,8	15	23,4
		Jättemäärä	68,4	Jättemäärä	1118	419,3		46,5
		Jättemäärä (t/v)	68					1584

HALLIT							
Kategoria t/kohde	Kaupunkien lkm	Purkukohteiden lkm	VARASTOHALLI 1,8	Kategoria t/kohde	Purkukohteiden lkm	LENTOKONEHALLI 2,7	Purkukohteiden lkm
A	8	0,5	7,2	A	0,3	6,5	0,3
B	5	1,0	9,0	B	0,5	6,8	0,5
C	5	1,5	13,5	C	1,0	13,5	1
		Jättemäärä	29,7		Jättemäärä	26,7	Jättemäärä
					Jättemäärä (t/v)		79

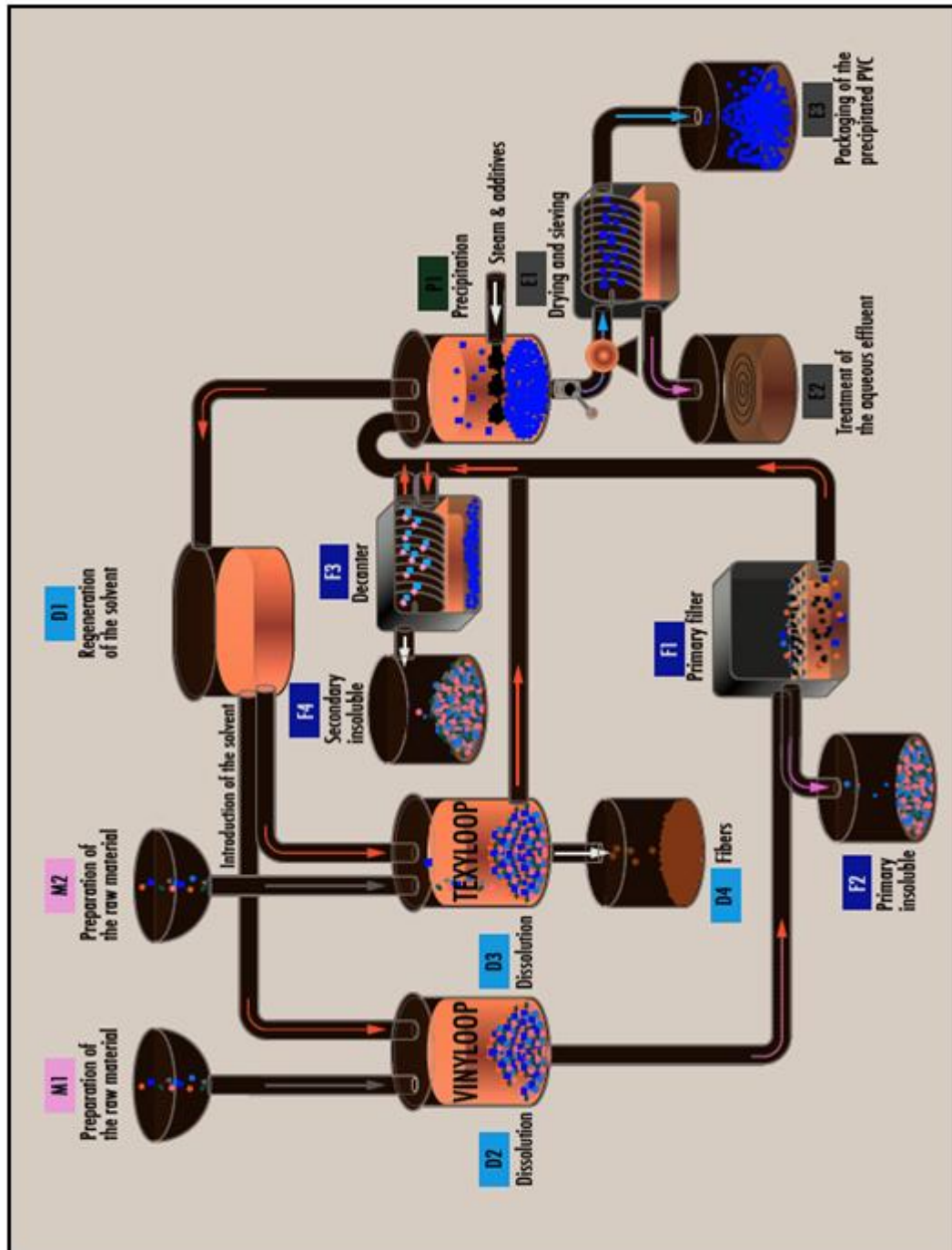
Ominaisuus	Arvo	Yksikkö
Tiheys	1200	kg/m ²
Maton paksuus	0,002	m
Maton paksuus (liik.halli)	0,005	m
Laatan paksuus	0,002	m
Peitteen paino	0,650	kg/m ²
Peitteen paino (hallit)	0,900	kg/m ²

VENEKUOMUT (30 m2)	
Veneiden lkm Suomessa	737 000
Osuus väestöstä 200km (43 %)	0,43
Veneitä arviolta 200km sisällä	316910
Kuomuja omistaa (arviolta 50 %)	0,5
Vuosittain uusi kuomu (15 %)	0,15
Jätteenä jäävät venekuomut (kpl)	23768,25
Yhden peitteen (30 m2) paino (kg)	19,5
Jättemäärä (t/v)	463

Jätelaji	Jäte (t/v)
Lattiamatot	1 332
Lattialaatat	141
Suojapeitteet & kevytpeitteet	1584
Hallit	79
Muut kohteet	532
Jättemäärä yhteensä	3 667

A Asukasluku < 70 000	Asukasmäärä
1 Hämeenlinna	66 789
2 Salo	55 132
3 Kotka	54 832
4 Mikkeli	48 832
5 Porvoo	48 815
6 Hyvinkää	45 510
7 Nurmijärvi	39 846
8 Rauma	39 715
B 70 000 < asukkaita < 150 000	
1 Jyväskylä	130 702
2 Lahti	101 463
3 Kouvola	88 107
4 Pori	83 032
5 Lappeenranta	72 011
C Asukkaita > 150 000	
1 Helsinki	587 787
2 Espoo	246 905
3 Tampere	212 885
4 Vantaa	199 678
5 Turku	177 342

LIITE 4: VINYLOOP®- JA TEXYLOOP® - PROSESSIT [44]



LIITE 5: MENETELMIEN EDUT JA HAITAT

Jauhatus	
Tekniset tekijät	
+ Syötteen määrä 3000...4000 t/v	- Prosessin toimivuus kyseenalainen heterogeenisellä syötteellä
+ Saatavan määrä arviolta 2000...3000 t/v	- Syöttemateriaalin epäpuhtausaste korkea
+ Yksinkertainen menetelmä	- Kuitupitoisen jätteen soveltuvuus
+ Suomen jätemäärille riittävä	- Laskuidun erottaminen
+ Energia hyvin saatavissa	- Lopputuotteen laadussa voi olla vaihtelua
+ Ei tarvita jätevesikäsittelyä	- Lisä- ja täyteainesisältö monimuotoinen
+ Metallit ja polysterikuitu kierrätetään	- PVC-kompaundin osuus jätteessä vähäinen
+ Nestetypin jäähdytykseen saatavilla	- Lopputuotteelle käyttökohteita rajoitetusti
+ Ei tarkkaa Cl-pitoisuusvaatimusta	
Taloudelliset tekijät	
+ Investointikustannukset 1-3 milj. €	- Suuret keräys- ja lajittelukustannukset suuret
+ Ylläpitokustannukset 300-400 €	- Uusiomateriaalin käyttökohteet tulisi olla tiedossa
+ Päästö- ja ympäristökulut kohtalaisen pienet	- Lopputuotteelle ostaja mieluiten Suomesta
	- Lopputuotteen arvo voi jäädä alhaiseksi
Muut tekijät	
+ Lauhe vähentää ensiömuovin tarvetta	- Murskeen valmistus ei vähennä ensiömuovin tarvetta
+ Poltettavan klooripitoisen jätteen määrä vähenee	- Kierätysmuovin valmistuksen soveltuvuus käsittelylaitokseen
+ Pehmitinaineet säilyvät PVC-kompaundissa	- Kapasiteetilla 1-2 t/h ajo kahdessa vuorossa
+ Voidaan ajaa panostyypillisesti	
Granulointi	
Tekniset tekijät	
+ Syötteen määrä 3000...4000 t/v	- Erottelumenetelmien soveltuvuus kyseenalainen pehmitetyllä PVC:llä
+ Saatavan määrä arviolta 1000...2000 t/v	- P-PVC:n ja kuitujen tiheydet lähellä toisiaan
+ Kohtalaisen yksinkertainen menetelmä	- Kuitujen irtoaminen matrisista kyseenalaisista
+ Jätevesien käsittely-osaaminen olemassa	- Lopputuote voisi sisältää kuitujaamia
+ Energia hyvin saatavissa	
+ Jätefraktio hyödynnettävä muulla tavoin	- Pesu-, kuivaus- ja ekstruusioprosessit vaativat kohtalaisen määrän energiaa
+ Ei tarkkaa Cl-pitoisuusvaatimusta	- Lisä- ja täyteaineiden monimuotoisuus
+ Lopputuote lisääntisettävissä	
Taloudelliset tekijät	
+ Lopputuotteella kohtalainen myyntihinta	- Suuret keräys- ja lajittelukustannukset
+ Investointikustannukset 1-3 milj. €	- Jatkuva-/panos-toiminen prosessi
+ Ylläpitokustannukset 300-400 €	- Edellyttää huolellisen manuaalisen lajittelun
+ Lopputuotteelle ostaja voisi löytyä Suomesta	- Ekstruusion kapasiteetti
Muut tekijät	
+ Lauhe vähentää ensiömuovin tarvetta	- Lopputuotteen määrää vaikea arvioida
+ Poltettavan klooripitoisen jätteen määrä vähenee	- Prosessin syötettävä jäte heterogeenista
+ Pehmitinaineet säilyvät PVC-kompaundissa	- Ekstrudoitavassa materiaalissa ei saa olla metallijäämiä

Integroitu Vinyloop-prosessi	
Tekniset tekijät	
+ Syötteen määrä 5000...6000 t/v	- Jättemäärä Suomessa voi olla riittämätön
+ Saatavan määrä 4000...4800 t/v (hyötysuhde 80 %)	- Jätteen PVC-pitoisuus oltava vähintään 80%
+ Erityisesti pehmitetylle PVC:lle + samalla kova PVC	- Laitteiden minimikoko voi rajoittaa toteutusta
+ Höyry ja energia hyvin saatavissa	- Voimakaiden kemikaalien käsittely
+ Jätevesien käsittely -osaaminen olemassa	- Suuri energian kulutus
+ Kaikki lopputuotteet hyödynnettävissä	- Integrointi edellyttää kytkentöjä (höyry,energia)
Taloudelliset tekijät	
+ Investointikustannukset 10-15 milj. €	- Patentin hankinta ja toteutus iso ja kallis projekti
+ Ylläpitokustannukset 400-500 €	- Lluottimen käsittely ja hankinta
+ Kierrätyskuidusta saatava hinta hyvä	- Jatkuva toiminen prosessi (korkeat ylläpitokustannukset)
+ Kierrätys-PVC:stä saatavissa neitseellistä vastaava hinta	- Yövoimakustannukset (usean henkilön työpanos)
+ Lopputuotteelle ostaja(t) mahdollisesti Suomesta	
+ Hyvä mahdollisuus tukirahoitukseen	
Muut tekijät	
+ Olemassa oleva osaaminen ja infrastruktuuri tukevat integrointia	- Edellyttää tukirahoitusta
+ Lopputuote lisäaineistettavissa halutulla tavalla	- Patentin hankinta voi viedä aikaa
+ Liuotin kierrätetään tehokkaasti (lähes 100 %)	- Prosessi voi olla turhan laajamittainen Suomeen
+ Teknisesti varmin mekaaninen kierrätystapa	
+ Kaapelijäte saataisiin mahdollisesti mukaan kierrätykseen	
Raaka-ainekierrätys	
Tekniset tekijät	
+ Syötteen määrä 8000...10 000 t/v	- Jättemäärä voi olla riittämätön
+ Epäherkin vaihtoehto syötteen suhteen	- Laitteiden minimikoko voi rajoittaa toteutusta
+ Puhdasta HCl:n tuotto	- Jätteen klooripitoisuus vähintään 30 %
+ Prosessin kytkennät (vesi, höyry, savukaasut) mahdolliset	- Edellyttää suuren kapasiteetin esilajittelijam
+ Kuona hyödynnettävissä	
+ Mahdollisuus suureen jätemäärään	
Taloudelliset tekijät	
+ Investointikustannukset > 15 milj. €	- Ostajien löytäminen HCl:lle
+ Ylläpitokustannukset > 500 €/t	- Kuonan hyötykäyttömahdollisuudet Suomessa selvittävä
+ Tukirahoitus mahdollinen	- Isossa investoinnissa suuremmat riskit
+ Tuotot energiasta ja kuonan hyötykäytöstä	
+ Säästöt hyödyntämällä olemassa olevaa infrastruktuuria	
Muut tekijät	
+ Olemassa oleva osaaminen ja infrastruktuuri	- Korkeat ylläpitokustannukset
+ Mahdollinen lajittelujärjestelmä käytössä tulevaisuudessa	- Ei edistä varsinaisesti materiaalkierrätystä
+ Teoriassa hyvä ratkaisu heterogeenisen PVC-jätteen käsittelemiseksi	- Prosessista tarvitaan tarkempia tietoja
+ Haitalliset liiyytstabilaattorit ja italaatipohmittimet eliminoitaisiin	

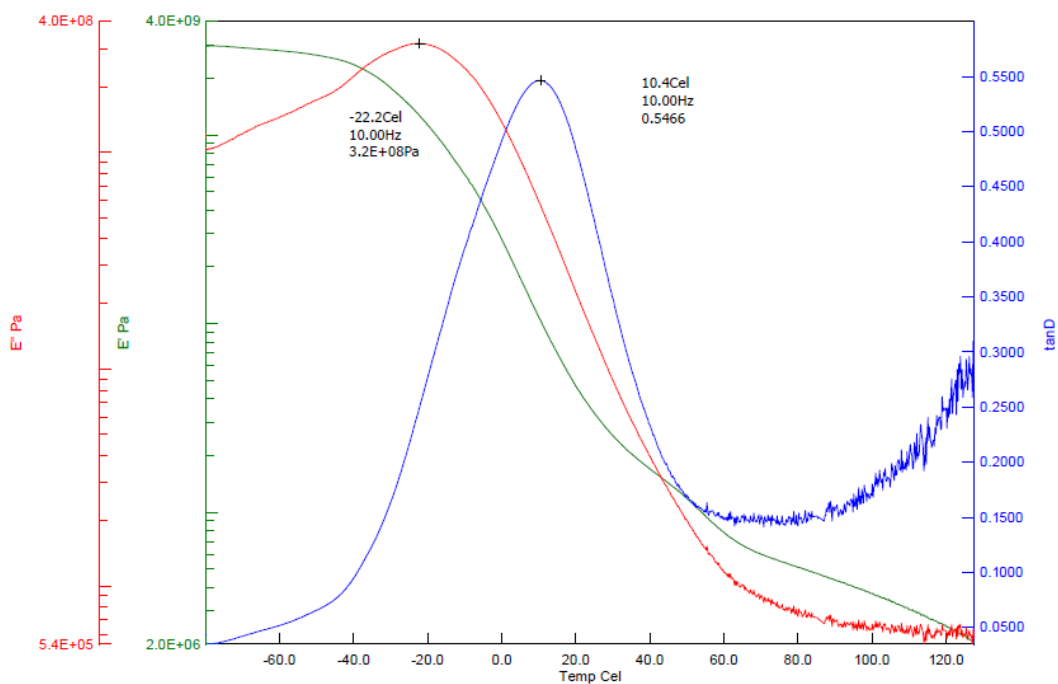
LIITE 6: EKSTRUUSION AJOARVOT

EKSTRUUSIOPÖYTÄKIRJA			
Sarjan nimike:		Ekstruusioajot	
Ekstruuder:		Yksiruuviekstruuder Brabender PL 2000	
Aika:		18.10. ja 26.10.2010	
Paikka:		TTY Polymeerihalli	
Materiaali:		Pehmitetty PVC	
Työn suorittaja:		Jyri Örling	
Koesarja: 18.10.2010		Neitseellinen	Kerran prosessoitu
Ruuvinnopeus	(rpm)	21	23
Sylinterilämmöt	1.(C)	184	186
	2.(C)	194	195
	3.(C)	192	192
	4.(C)	24	26
Suutinlämpötila	flange1	196	199
Työkalulämpötila	tool(C)	200	200
Koesarja: 26.10.2010		Neitseellinen	Kerran prosessoitu
Ruuvinnopeus	(rpm)	22	22
Sylinterilämmöt	1.(C)	196	198
	2.(C)	198	201
	3.(C)	190	190
	4.(C)	25	24
Suutinlämpötila	flange1	196	197
Työkalulämpötilat	tool(C)	200	200

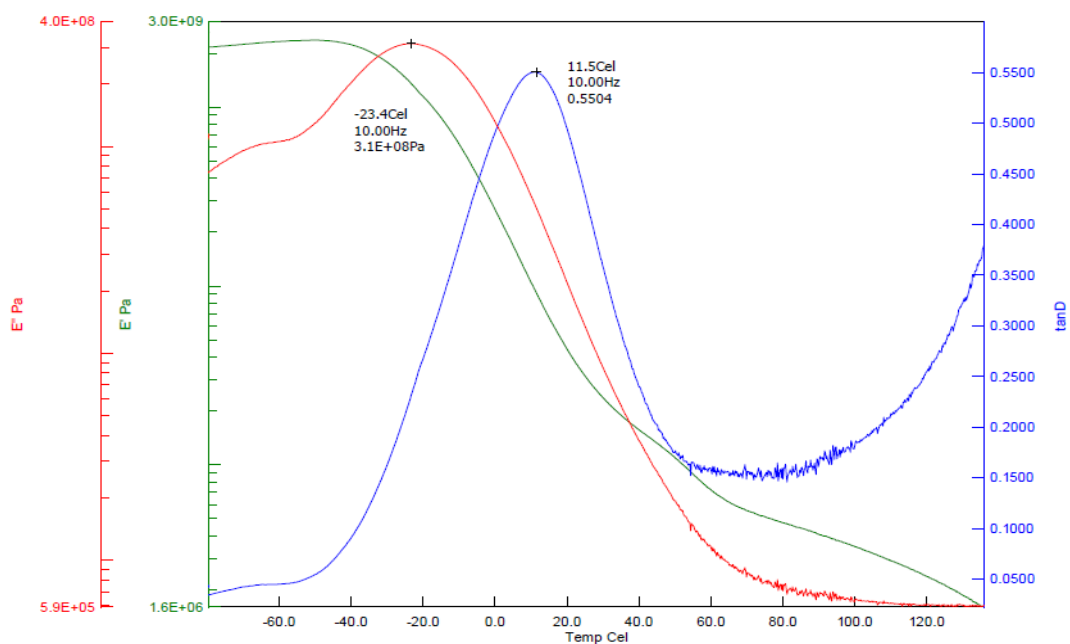
LIITE 7: RUISKUVALUJEN AJOARVOT

RUISKUVALUPÖYTÄKIRJA								
Sarjan nimike:	Ruiskuvaluajot							
Ruiskuvalukone:	KrausMaffei KM50-90C2							
Aika:	18.11.2010							
Paikka:	TTY Polymeerihalli							
Materiaali:	Pehmitetty PVC							
Työn suorittaja:	Antti Valtonen							
Muottitiedot:	Koesauva 2-pesäinen muotti							
		Neitseellisen PVC	1 kerran prosessoitu materiaali			2 kertaa prosessoitu materiaali		
Koesarja	Yksikkö		20%	40%	60%	20%	40%	60%
Ruiskutusnopeus:	(mm/s)	80	80	80	80	80	80	80
Ruiskutuspain	(bar)	700	700	700	600	700	700	700
Painneenvaihto	hydr.(bar)	562	562	562	562	562	562	562
	matka(mm)	27	27	27	27	15	15	15
Jälkipaine1 (0.5s)	(bar)	50	50	50	50	50	50	50
Jälkipaine2 (7.5s)	(bar)	500	500	500	-	-	-	-
Jälkipaine3 (4.5s)	(bar)	-	-	-	450	450	450	450
Jäähdytysaika	(s)	20	20	20	20	20	20	20
Jälkipaineaika	(s)	7.5	7.5	7.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Annostusmatka	(mm)	101	101	101	101	81	81	81
Annostusnopeus	(rpm)	130	150	150	170	142	160	180
Vastapaine	(bar)	20	15	15	20	20	20	20
Tyyny(mitattu)	(mm)	5	0	0	0	5	5	5
Sylinterilämmöt	1.(C)	185	185	185	185	180	180	180
	2.	180	180	180	180	175	175	175
	3.	175	175	175	175	170	170	170
	4.	170	170	170	170	165	165	165
Muottilämpötilat	etumuotti	40	40	40	40	40	40	40
	takamuotti	40	40	40	40	40	40	40

LIITE 8: DMA-ANALYYSITULOKSET

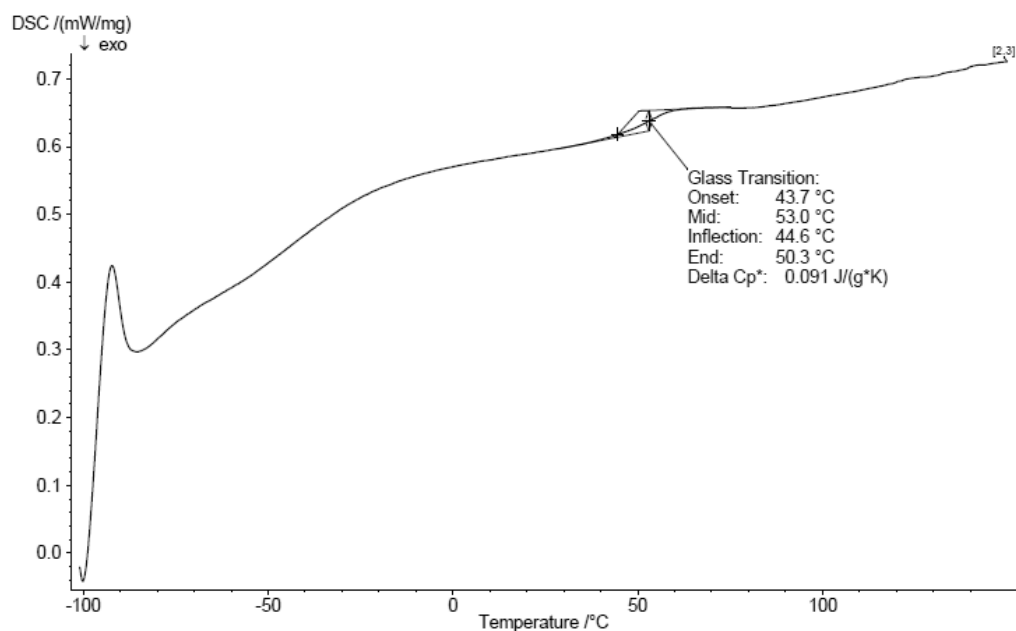


Kuva 1. Neitseellisestä materiaalista valmistetun koesauvan DMA-käyrät.

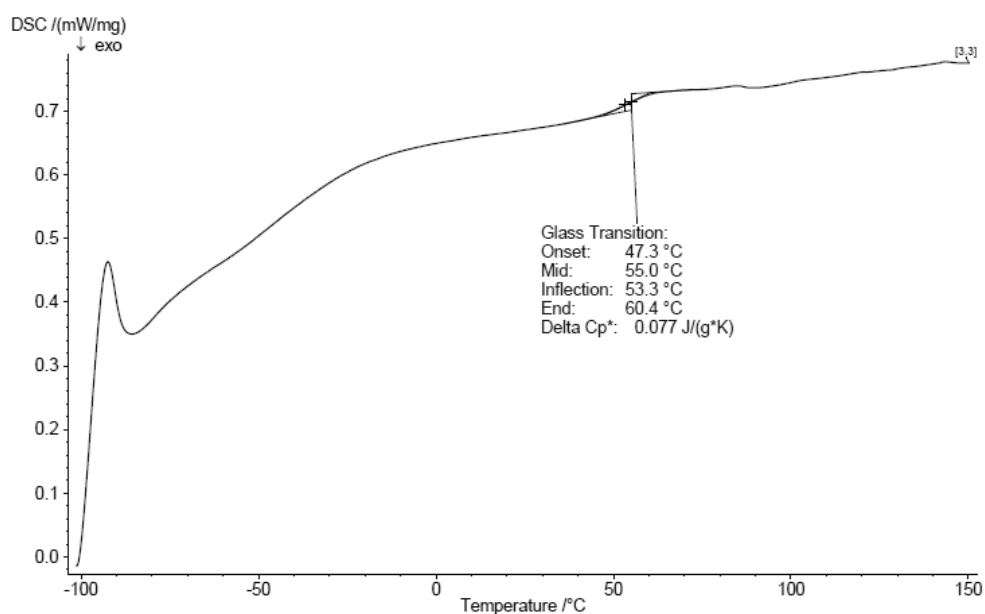


Kuva 2. Kahdesti kierrätettyä materiaalia (60 p-%) sisältäneen koesauvan DMA-käyrät.

LIITE 9: DSC-ANALYYSITULOKSET



Kuva 1. Neitseellisestä materiaalista valmistetun koesauvan DSC-käyrä.



Kuva 2. Kahdesti kierrätettyä materiaalia (60 p-%) sisältäneen koesauvan DSC-käyrä.

LIITE 10: KOVUUSKOKEESTA SAADUT SHORE A KOVUUSARVOT

KOVUUSMITTAUSPOYTÄKIRJA							
Kovuusmittaus:		Shore-A		Työnsuorittaja:		Maria Poropudas	
Päivämäärä:		14.12.2010		Standardi:		SFS-ISO 868	
Paikka:		TTY Laboratorio		Lämpötila:		19 °c	
Materiaali:		Pehmitetty PVC					
Neitseellinen PVC			0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Leveys (mm)	19.9	Keskiarvo	75.8	70.7	69.06	68.54	68.1
Paksuus (mm)	3.85	Keskihajonta	0.40	1.72	0.67	0.68	0.66
1 krt kierrätetty (20%)			0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Leveys (mm)	20.01	Keskiarvo	76	70	68.4	67.76	66.94
Paksuus (mm)	3.83	Keskihajonta	0.00	3.16	1.71	1.54	1.68
1 krt kierrätetty (40%)			0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Leveys (mm)	19.82	Keskiarvo	75	67.8	67.1	66.6	66.14
Paksuus (mm)	3.85	Keskihajonta	0.63	0.68	0.66	0.66	0.60
1 krt kierrätetty (60%)			0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Leveys (mm)	19.86	Keskiarvo	75.4	70.3	69.16	68.58	68.24
Paksuus (mm)	3.9	Keskihajonta	2.80	3.08	2.92	2.91	2.90
2 krt kierrätetty (20%)			0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Leveys (mm)	19.9	Keskiarvo	75.6	69.3	68.4	67.86	67.5
Paksuus (mm)	3.85	Keskihajonta	0.49	0.51	0.53	0.49	0.61
2 krt kierrätetty (40%)			0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Leveys (mm)	19.9	Keskiarvo	75.8	69.76	69.06	68.64	68.22
Paksuus (mm)	3.85	Keskihajonta	0.40	0.50	0.39	0.31	0.23
2 krt kierrätetty (60%)			0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Leveys (mm)	19.9	Keskiarvo	75.2	69.04	68.2	67.66	67.22
Paksuus (mm)	3.85	Keskihajonta	1.72	2.29	2.32	2.29	2.31

LIITE 11: VETOKOKEESTA SAADUT MURTOLUJUUKSET JA MURTOVENYMÄT

Neitseellinen PVC	Murtolujuus (Mpa)	Murtovenymä (%)
Keskiarvo	10.82	287.53
Keskihajonta	0.17	7.61

1 krt kierrätettyä 20%	Murtolujuus (Mpa)	Murtovenymä (%)
Keskiarvo	10.29	305.91
Keskihajonta	0.13	11.17

1 krt kierrätettyä 40%	Murtolujuus (Mpa)	Murtovenymä (%)
Keskiarvo	10.02	283.79
Keskihajonta	0.24	16.53

1 krt kierrätettyä 60%	Murtolujuus (Mpa)	Murtovenymä (%)
Keskiarvo	10.48	309.35
Keskihajonta	0.07	6.20

2 krt kierrätettyä 20%	Murtolujuus (Mpa)	Murtovenymä (%)
Keskiarvo	10.50	294.12
Keskihajonta	0.10	8.19

2 krt kierrätettyä 40%	Murtolujuus (Mpa)	Murtovenymä (%)
Keskiarvo	10.41	301.79
Keskihajonta	0.09	4.97

2 krt kierrätettyä 60%	Murtolujuus (Mpa)	Murtovenymä (%)
Keskiarvo	10.43	302.65
Keskihajonta	0.19	12.36